

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра радиофизики

Направление «Прикладные математика и физика»



МЕТОДЫ РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ
ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Бакалаврская работа студента
дневного отделения
Матвиюка Александра Сергеевича

Научный руководитель:
ст.преп. **Статуя А.А.**

Рецензент:
ведущий инженер ПГ «Таврида Электрик»
Борисенко П.А.

Санкт-Петербург
2017

Оглавление

Введение.....	3
1. Основные положения теории поведения материалов при однократном механическом воздействии. Обзор литературы.....	5
1.1 Виды разрушений.	5
1.2 Диаграмма напряжение-деформация.	7
1.3 Объекты испытаний. Требования к образцам и их классификация.....	10
2. Экспериментальное исследование поведения материалов при растяжении, определение их механических свойств.....	14
2.1 Описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов....	15
2.1 Результаты испытаний образцов из поликарбоната.	20
2.1.1 Поликарбонат Lexan 940A.	20
2.1.2 Поликарбонат Lexan 3412R.....	26
2.1.3 Поликарбонат Lexan 500R.....	33
2.2 Результаты испытаний образцов из полиамида.....	34
2.2.1 Полиамид Armamid PASV30.....	35
2.2.2 Полиамид Tehnamid PA66.....	39
2.2.3 Полиамид BASF B3ZG3.....	41
2.2.4 Полиамид Poliamid PA610 SV30.....	42
2.3 Выводы.....	44
3. Численный расчет одноосного растяжения.....	44
3.1 Математическая постановка задачи.....	46
3.2 Выбор и обоснование численной модели.....	48
3.3 Особенности решения задач механики сплошных сред с использованием нелинейных свойств материалов.....	50
3.3.1 Задание свойств материала в ANSYS.....	52
3.4 Результаты моделирования.	54
3.4.1 Результаты моделирования образцов из поликарбонатов. Сопоставление результатов эксперимента с моделированием.....	54
3.4.2 Результаты моделирования образцов из полиамидов. Сопоставление результатов эксперимента с моделированием.....	62
3.5 Выводы.....	67
Список литературы	68

Введение

Инженерные расчеты любых конструкций невозможны без предварительных сведений о материалах, из которых они изготавливаются. Все фактические сведения о конструкционных материалах, т.е. их механические характеристики, получают экспериментально. В основе данной работы лежит методика проведения расчета упругопластического деформирования и разрушения элементов конструкций при однократном растяжении.

В первой части работы даётся описание поведения материалов при однократном механическом воздействии и различных механизмов разрушения. Вторая часть посвящена экспериментальному исследованию поведения материалов при растяжении и определению их механических свойств. В третьей части приведены методы моделирования упругопластического поведения материалов в ANSYS, проведена верификация результатов расчетов по экспериментальным данным.

Цель работы. Разработка расчетной методики упругопластического деформирования с помощью метода конечных элементов с использованием экспериментальных кривых. Экспериментальное исследование механической прочности полиамидов и поликарбонатов для верификации с методикой проведения расчета упругопластического деформирования в конечно элементном пакете ANSYS.

Актуальность. Механическая прочность таких материалов, как полимеры, сталь и сплавы представляет собой особый интерес при изготовлении вакуумных выключателей. Одной из главных проблем, возникающих при проектировании любой установки, в частности, высоковольтных вакуумных выключателей, является выбор оптимального материала для достижения необходимых характеристик устройства, в том числе способность материала выдерживать внешние нагрузки. Экономичность и надежность в большей степени определяется расходом материала, возможностью изготовления частей конструкции по наиболее прогрессивным

технологиям, в частности, использования материалов армированными или стекло наполненными.

Практическая значимость. Существует большое количество экспериментальных методик исследования механических свойств материала. В соответствии с этим методы испытаний унифицируются в рамках ГОСТов, правил и международных рекомендаций с целью получения сопоставимых данных. К механическим характеристикам относится модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности.

При изучении характера деформируемости наиболее ценные сведения о каждом материале можно получить из диаграмм испытания образцов. Диаграммой растяжения называется график, показывающий функциональную зависимость между нагрузкой и деформацией при статическом растяжении образца до его разрыва. Получение наиболее точных диаграмм является первостепенным для задания свойств материала в любом конечно элементом пакете, в частности, в ANSYS, т.к. это способствует более точному совпадению эксперимента с моделированием. Продолжение данной работы в дальнейшем позволит создать базу данных материалов, использование которых в конечно элементных пакетах, сможет заменить экспериментальные исследования, что приведет к экономии ресурсов и времени.

Научная значимость. В настоящее время при проектировании различных конструкций большим спросом пользуются такие материалы, как полиамиды и поликарбонаты. Как и многие другие материалы, в частности, полиамиды редко используются в чистом виде. Таким образом, полиамиды делаются наполненными, а сам процесс носит название армирование. Данный процесс существенно изменяет характеристики материала. Кроме того, многие материалы способны изменять свои свойства под воздействием различных факторов внешней среды, например, влажности и температуры. Подобное поведение материалов представляет особый интерес в научной сфере.

1. Основные положения теории поведения материалов при однократном механическом воздействии. Обзор литературы.

1.1 Виды разрушений.

Разрушение является чрезвычайно сложным, многостадийным процессом, который зависит от множества факторов. Можно получать различные характеристики процесса разрушения в зависимости от изменяющихся условий. Разрушение - это один из видов нарушения прочности, которые могут происходить в результате: 1) чрезмерной (упругой или пластической) деформации, 2) потери устойчивости, 3) физического разделения конструкции на части [1].

Факт того, что нет общепринятого определения разрушения и общепринятой классификации видов разрушения говорит о сложности и неоднозначности явления [2].

Изучение критериев деформирования и разрушения материалов связано с анализом напряженно-деформированного состояния в отдельных зонах деформированного тела. В этом случае можно использовать различные экспериментальные методы. Выбор экспериментальных методов исследования напряженно-деформированного состояния зависит от специфики рассматриваемой задачи, условий измерения деформаций, сложности аппаратуры и ее точности. [3].

В общем случае явление механического разрушения определяется, как любое изменение размера, формы или свойств материала конструкции, в результате чего деталь утрачивает способность выполнять свои функции. На основании этого, разрушение представляет собой физический процесс или несколько взаимосвязанных между собой процессов, которые приводят к потере прочности материала [1].

Разрушение может быть частичным или полным. В первом случае в теле возникают повреждения в виде отдельных трещин, приводящие к изменению механических свойств. Во втором- происходит разделение тела на части.

Классифицируют следующие виды разрушений [4]:

Упругая деформация. Это такой вид разрушения, когда упругая (обратимая) деформация элемента, возникающая при воздействии эксплуатационных нагрузок, становится настолько большой, что элемент утрачивает способность выполнять предназначенную ему функцию.

Текучесть. Это такой вид разрушения, когда пластическая (необратимая) деформация пластичного элемента, возникающая при действии эксплуатационных нагрузок, становится настолько большой, что элемент утрачивает способность выполнять предназначенные ему функции.

Вязкое (пластическое) разрушение. Это такой вид разрушения, когда пластическая деформация достигает такой величины, что пластический элемент разделяется на две части. Разрушение происходит в результате процесса зарождения, слияния и распространения внутренних пор, поверхность разрушения при этом гладкая и волнистая.

Хрупкое разрушение. Это такой вид разрушения, когда упругая деформация элемента из хрупкого материала достигает такой величины, что разрушаются первичные межатомные связи и элемент разделяется на две или более части. Внутренние дефекты и образующиеся трещины быстро распространяются до полного разрушения; поверхность разрушения при этом неровная, зернистая.

Хрупкое разрушение подразделяется на идеально хрупкое и квазихрупкое.

Идеально хрупкое или хрупкое разрушение происходит без пластической деформации. После разрушения можно заново собрать тело прежних размеров из образовавшихся осколков.

Квазихрупкое разрушение предполагает наличие пластической зоны перед краем трещины (локальная зона пластической деформации) и наклепанного материала у поверхности трещины. Остальной, значительно больший по величине, объем тела находится при этом в упругом состоянии.

1.2 Диаграмма напряжение-деформация.

Процессы деформирования и разрушения представляют практический интерес для всех материалов. Они происходят при непосредственной эксплуатации конструкций и отдельных деталей. Деформация- это величина, характеризующая изменение начальных форм и размеров образца под действием внешних сил.

Одной из важнейших характеристик материалов является присущая им прочность и стойкость к разрушению (распространение трещин). Для каждого материала процесс деформирования происходит по-разному, однако существуют основные участки, характеризующие поведения материала до разрушения, описание которых приведено ниже.

Поведение материала в области упругих деформаций с достаточно хорошим приближением описывается законом Гука, который определяет прямую пропорциональность между напряжением и упругой деформацией [5]. Опыт показывает, что закон Гука выполняется лишь в определенном интервале напряжений. На рис.1.1 изображена зависимость деформаций от напряжений, называемая диаграммой растяжений. При малых значениях напряжения деформация большинства твердых тел мала и является упругой, то есть после удаления деформирующей нагрузки материал возвращается к своим первоначальным размерам и форме. Упругому линейному закону на этой диаграмме соответствует участок 1, когда $0 < \sigma \leq \sigma_n$.

$$\sigma = \varepsilon E \quad (1)$$

Где E - модуль упругости (или Юнга) материала, который является мерой жесткости материала, т.е. является коэффициентом пропорциональности, связывающий напряжение и деформацию. Максимальное напряжение σ_n , до которого напряжение и деформация остаются пропорциональными называется пределом пропорциональности.

При напряжениях, превосходящих предел пропорциональности, закон Гука уже не выполняется, но деформации остаются упругими. Это означает,

что если растягивать образец, последовательно увеличивая от нуля возрастающую силу, то каждый раз, после снятия нагрузки, деформация исчезает. Упругому нелинейному поведению материала соответствует 2 участок на диаграмме напряжения-деформации. Однако при некотором напряжении $\sigma \geq \sigma_y$ деформация не полностью исчезает при снятии нагрузки, появляется заметное остаточное удлинение. Такие деформации называются неупругими или пластическими и напряжение σ_y – предел упругости.

Участок 3 на диаграмме соответствует пластическим деформациям. Если увеличивать нагрузку, то возникает явление текучести, т.е. происходит внезапный рост удлинения образца при постоянной нагрузке σ_t , называемой пределом текучести. Отметим, что течение материала происходит неравномерно по всей длине исследуемого образца: в некотором месте можно заметить образование шейки. Дальнейшее растяжение образца происходит только за счет удлинения его шейки. Длина шейки растет до тех пор, пока не распространится на всю его растягивающую часть образца, причем толщина шейки останется постоянной [6]. Претерпев состояние текучести, т.е. удлинившись на некоторую величину при постоянном значении силы, материал снова приобретает способность сопротивляться растяжению (упрочняться). Кривая на диаграмме поднимается вверх более полого, в сравнении с предыдущем участком (участок 4 на диаграмме напряжения-деформации).

Наличие участка упрочнения, который имеет место от конца площадки текучести до наивысшей точки диаграммы растяжения, объясняется тем, что происходит микроструктурные изменения материала. Таким образом, при увеличении нагрузки на образец, микроскопические дефекты группируются так, что развитие сдвигов волокон, вызванных касательными напряжениями, затрудняется. Это обусловлено ориентацией и выравниванием полимерных цепей в направлении нагрузки, что увеличивает прочность и жесткость пластмассы в направлении растяжения и объясняет наблюдаемое увеличение (*истинного*) напряжения. При максимальном напряжении σ_{np} , называемом

пределом прочности, в этом ослабленном сечении происходит разрыв образца по наименьшему сечению шейки (5 участок диаграммы).

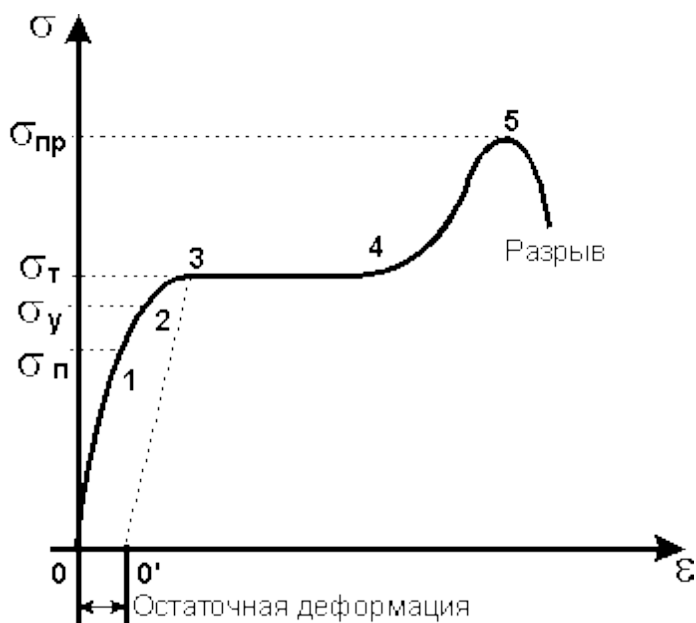


Рис. 1.1. Диаграмма напряжение-деформация.

Надо отметить, что приведённый на диаграмме выше вид кривой напряжение-деформация является обобщённым и различные материалы могут не иметь одного или нескольких из описанных выше участков. Видом диаграммы в частности и определяется склонность материала к тому или иному типу разрушения.

Полимеры могут проявлять различные типы напряженно-деформированного поведения в зависимости от кривой напряжения-деформации. Существуют полимеры деформация которых осуществляется только по закону Гука, для других при определенном значении напряжения происходит вытягивание полимера, сопровождающаяся ориентацией макромолекул [7].

Начальный наклон кривой напряжение-деформация задается модулем Юнга. Для полимеров модуль Юнга значительно варьируется от материала к материалу и может достигать до 4 ГПа. Такие полимеры демонстрируют высокую устойчивость к нагрузке.

Деформационные особенности пластмасс характеризуются значением относительной деформации ϵ , которая сопровождается приложением нагрузки

(растяжение, сжатие, изгиб). По этому параметру полимерные материалы условно подразделяются на хрупкие ($\varepsilon < 5\%$), упругие ($5\% < \varepsilon < 50\%$), и пластичные ($\varepsilon > 50\%$).

Условия определения статических механических свойств стандартизированы. Испытания на сжатие – ГОСТ 4651, на изгиб- ГОСТ 4648, на растяжение- ГОСТ 11262, на срез- ГОСТ 10044. Модуль упругости полимерных материалов определяется в соответствии с ГОСТом 9550 [8].

Существует большая группа композиционных полимерных материалов, которые составляют армированные пластики. В данных пластиках в качестве полимерной матрицы используют различные термоактивные и термопластические полимеры, а также их делают армированными, используя волокнистые и листовые материалы из стекла, полимеров, базальта, углерода и других материалов [9].

1.3 Объекты испытаний. Требования к образцам и их классификация.

Образцы, элементы конструкций и конструкции в натуральную величину являются объектами исследований при механических испытаниях. Наиболее часто встречается понятие образец. Образец- это объект специальной формы, который испытывают для оценки механических свойств материала. На сегодняшний день проводят испытания для образцов с различными формами, размерами, назначением. Отдельные типы образцов регламентируются нормативами. Такие образцы испытывают на одноосное растяжение и сжатие, на изгиб и кручение, образцы для усталостных испытаний и т.д. [10].

Для сопоставления и воспроизведения полученных результатов при механических испытаниях образцы должны отвечать определенным требованиям. Заготовки образцов должны быть отобраны из листов или отливок одной и той же плавки или партии.

Любой образец имеет рабочую область, в которой осуществляются однородные напряжения и деформированные состояния. В связи с тем, что не

существует метода прямой оценки напряжений в точках деформированного тела, необходимо рассматривать рабочую область, где реализованы однородные напряженно-деформированные состояния. Существуют методики исследования напряженно-деформированного состояния образцов, которые дают возможность измерять деформацию на внешней поверхности исследуемого тела. Значения напряжений в точках образца определяют по внешним силам, но только при соблюдении соответствующих условий.

Условия проведения эксперимента соотносятся с выбором формы исследуемого образца, приложенным к нему внешним силам, чтобы с предельной степенью точности можно было считать, что напряженное и деформированное состояния во всех точках исследуемого образца одинаковы, т. е. в нем создано однородное напряженно-деформированное состояние. Предоставление таких условий эксперимента, по измерениям взаимных перемещений точек на поверхности исследуемого образца позволяют делать выводы о деформациях во внутренних точках. Таким образом, по измеренным внешним силам становится возможным рассчитывать напряжения во внутренних точках исследуемого образца, приняв гипотезы однородности, сплошности и изотропности.

В основном исследуемый образец представляется в виде круглого стержня, кольцевого или прямоугольного поперечного сечения. Форма рабочей части образца, где реализуются однородные напряжения и деформированные состояния, зависит от типа заготовки. Если заготовка представляет собой прутки, отливку или лист большой толщины, то рабочая часть образца имеет цилиндрическую форму; если заготовка – относительно тонкий лист, то рабочая часть образца имеет призматическую форму. Процесс получения заготовки образца регламентируется нормативными документами. Предпочтительным является образец цилиндрической формы.

Образец получают такими механическими обработками, как точение, фрезерование, шлифование, полирование. При этом предполагается, что

механические свойства материала исследуемого образца относительно механических свойств исходных заготовок, не меняются.

Предъявляются требования к геометрической форме образца, которые регламентируются нормативными документами и инструкциями. Достоверность полученных результатов, оценка и воспроизведение их в последующих опытах, неотъемлемо связано с совершенством геометрической формы образца. Категорически недопустимы любые изменения поперечных размеров рабочей области образца, искривление его оси и другие геометрические несовершенства формы. Данные дефекты приводят к неоднородности напряженно-деформированного состояния выше допустимых значений, предусмотренных инструкциями и ГОСТами.

Состояние поверхности рабочей области образца оказывает большое влияние на результаты механических испытаний. Наличие таких дефектов как царапины, вмятины, острые надрезы, раковины приводят к локальному изменению напряженно-деформированного состояния, что, в свою очередь, приведет к преждевременному разрушению материала и искажению результатов опыта.

Образец должен быть однородным по химическому составу и микроструктуре для проведения механических испытаний. Рабочая область исследуемого образца не должна иметь раковин, волосовин, трещин, инородных включений и других дефектов структуры, которые отрицательно влияют на распределение внутренних сил и приводят к неоднородности напряженно-деформированного состояния.

Структурное состояние образцов различных материалов сильно зависит от термообработки, поэтому она должна строго соответствовать нормам. На структурное состояние поверхностных слоев образца оказывают влияние режимы механической обработки, к которым относится скорость, глубина резания, охлаждение, которые приводят к поверхностному наклепу, что особенно нежелательно для образцов малых размеров.

Наиболее распространенный вид испытаний для получения механических свойств образца является испытание на одноосное растяжение, т.к. данный вид испытания сравнительно легко подвергается анализу, позволяет определить сразу несколько механических характеристик по результатам одного опыта, являющихся критерием его качества и знание которых являются необходимыми для инженерных расчетов.

Методы испытаний на одноосное растяжение имеют свои ГОСТы и стандарты. Различаются отдельные стандарты на испытания при комнатной температуре (ГОСТ 1497-84), при повышенных до 1473 К (ГОСТ 9651) и пониженных от 273 до 173 К (ГОСТ 11150) температурах. Основные требования к методике испытаний изложены в стандартах. Данные требования являются минимальными. Для выполнения исследовательских работ требования могут быть значительно повышены.

Для испытаний на одноосное растяжение (ГОСТ 1497-84) используют стандартные образцы круглого или прямоугольного сечения, для которых отношение расчетной длины l_0 к диаметру поперечного сечения d_0 равно десяти (рис. 1.2). Если образец имеет некруглое сечения, то вместо диаметра принимают величину $\sqrt{a_0}$, где a_0 – толщина образца. Если по каким-либо причинам не удастся изготовить образцы стандартных размеров, то применяют так называемые пропорциональные образцы, которые имеют меньшее сечение, но с тем же соотношением размеров. Для испытаний листовых материалов используют плоские образцы. На концах всех образцов имеются дополнительные головки, необходимые для захвата их машиной, форма и размеры которых зависят от конструкции приспособлений для захвата. Необходимо обеспечить плавные переходы размеров между рабочей частью и головками образца.

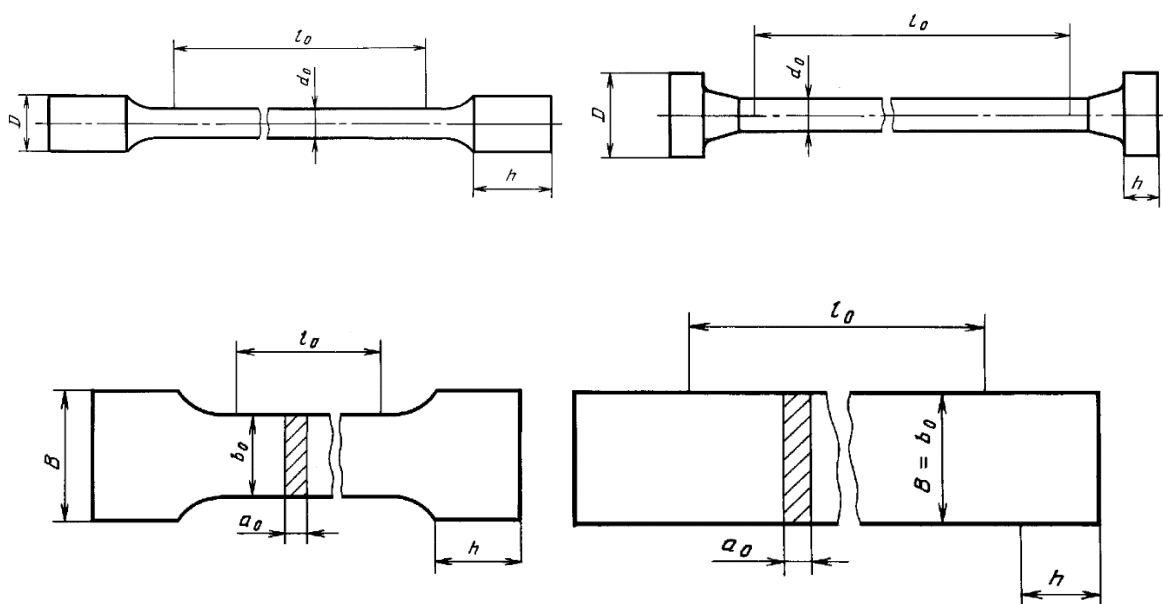


Рис. 1.2. Примеры образцов для испытаний на растяжение цилиндрические (сверху) и плоские (снизу).

2. Экспериментальное исследование поведения материалов при растяжении, определение их механических свойств.

Статические испытания, для которых характерны малые скорости нагружения, проводят на универсальных испытательных машинах и специальных установках. Происходит это путем одно-и многоканальной системы нагружения. В основном используют автоматические системы управления нагружением. Для управления и обработки результатов применяются электронно-вычислительные машины. Основная задача этих машин состоит в определении механических характеристик материалов. При необходимости в рабочем пространстве испытательных машин размещают термокамеры, криостаты, вакуумные камеры и т. д.

Созданы разнообразные виды стандартных и оригинальных испытательных машин, которые отличаются по типу нагружения (растяжение–сжатие, изгиб, кручение), по величинам нагрузок, значениям скоростей перемещений траверсы и системам записи.

Нагружение в испытательных установках обычно электромеханическое или гидравлическое. При проведении испытаний деформируется не только образец, но и детали самой испытательной установки. При увеличении модуля упругости испытуемого образца данный эффект усиливается. Соответственно, с перемещением траверсы, происходит деформация как рабочей области испытуемого образца, так и его концевых участков, захватов, нагружающей рамы и механизма. Для устранения данного эффекта и получения значения деформации рабочей области следует производить измерение деформации непосредственно на ней. Самый распространённый способ таких измерений является тензометрирование.

Тензометрирование- это измерение деформаций поверхностного слоя образца под действием заданных внешних сил [11]. Тензометрия представляет собой экспериментальное исследование напряженного состояния объекта, основанное на измерении малых деформаций. Метод основан на измерении приращения электрического сопротивления проводника, деформируемого совместно с деталью, к которой он механически прикреплен. Измерение деформаций происходит с помощью тензометров. Сложность получения данных таким путем связана с малым диапазоном изменения сопротивления под воздействием деформации.

Экстензометры позволяют точно измерять относительные удлинения (продольные и поперечные деформации) непосредственно на поверхности самого образца. При использовании экстензометров упругая деформация испытательной машины исключается.

2.1 Описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов.

В данной работе для проведения экспериментального исследования используется испытательная машина корпорации Instron®, которая является мировым лидером в области производства оборудования для испытаний материалов. Испытательные машины фирмы Instron® отличаются высокой

степенью надёжности, точностью задания и измерения нагрузок, перемещений и деформаций. Испытания проводились на испытательной системе Instron® 5985 (Рис. 2.1).

Характеристики испытательной системы:

- Максимальное усилие 250 кН
- Испытательное пространство 1430 мм по вертикали
- Перемещение траверсы 1330 мм по вертикали
- Максимальная скорость траверсы 508 мм/мин
- Точность измерения нагрузки: $\pm 0,5\%$ показания вплоть до 1/500 допустимой нагрузки на датчик.
- Точность измерения деформации: от $\pm 0,5\%$ показания вплоть до 1/100 полной шкалы для всех экстензометров класса В по ASTM E83 или класса 0,5 по ISO 9513.
- Точность измерения положения: $\pm 0,02$ мм или 0,05% перемещения (большее из значений)
- Частота одновременной регистрации данных до 1 кГц по каналам нагрузки, удлинения и деформации



Рис. 2.1. Испытательная система Instron® 5985.

Для измерения деформаций использовался современный навесной экстензометр Instron® с базовой длиной 50мм и перемещением $+50\% - 5\%$, (Рис. 2.2) Основными элементами экстензометра являются тензодатчики (тензорезисторы) и непосредственно электронный измеритель деформаций – преобразователь. Расстояние между тензодатчиками называется базовой длиной.

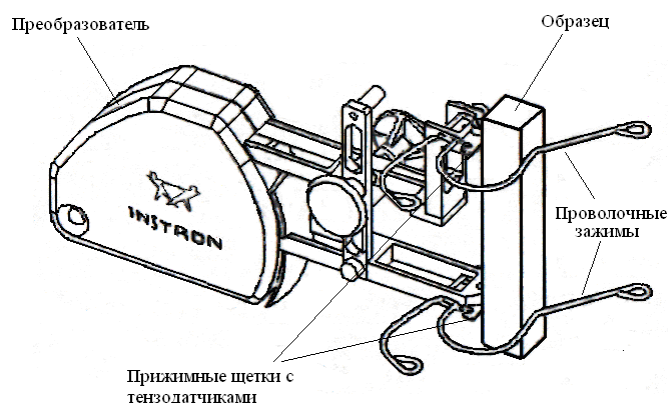


Рис. 2.2. Навесной экстензометр.

Испытываемый образец фиксировался в плоских захватах, после чего траверса начинала перемещение с постоянной скоростью. По стандарту на проведение испытаний ГОСТ 1497-84, при испытании скорость перемещения подвижного захвата машины не должна превышать:

- до предела текучести – 2 мм/мин,
- за пределом текучести – 10 мм/мин.

В процессе испытаний снимались следующие данные: перемещение траверсы (мм), растягивающее усилие траверсы (Н), продольные и поперечные деформации с экстензометров (мм/мм).

Для каждого из испытанных образцов велась видеозапись процесса испытания, синхронизированная по времени с перемещением траверсы.



Рис. 2.3. Установленный в захваты образец с навесным экстензометром.

Для изучения характера деформируемости используют диаграммы испытания образцов. Диаграммой растяжения является график, который показывает функциональную зависимость между нагрузкой и деформацией. Он представляет собой кривую, характеризующую поведение материала от начала растяжения образца до его разрыва. Для электромеханической машины, на которой проводились испытания, первичной является деформация, а нагрузка вторичной, поэтому осью абсцисс (аргументом) является абсолютное удлинение, а осью ординат (функцией) – нагрузка. Однако в реальных условиях эксплуатации машин и сооружений первичной является нагрузка, функциональную зависимость при инженерных расчетах обращают и изменяют, ссылаясь на то, что деформация образца изменяется в зависимости от нагрузки. Координаты диаграммы растяжений не являются качественными характеристиками материала, т.к. сила, растягивающая образец, зависит от площади сечения, а удлинение образца – от его длины. Чтобы исключить влияние размеров и получить диаграмму, характеризующую поведение не образца, а самого материала, необходимо перевести диаграмму растяжений в координаты напряжение–деформация.

Существует два вида напряжений: истинное σ_{true} и инженерное σ_{eng} . Для определения инженерного напряжения, необходимо нагрузку F отнести к начальной площади поперечного сечения образца A_0 , таким образом, частное

от деления считают инженерным напряжением. Полученное уравнение выглядит следующим образом: $\sigma_{eng} = F/A_0$. Следует обратить внимание на то, что изменение площади поперечного сечения не учитывается, хотя в действительности она непрерывно уменьшается. Если отнести нагрузку F к текущей, постоянно изменяющейся площади A , то частное от деления называют истинным напряжением $\sigma_{true} = F/A$. Инженерные напряжения в каждый момент времени меньше истинных. Большинство характеристик прочности – инженерные напряжения. Таковыми являются: предел упругости, предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности.

Продольная инженерная деформация ε_{eng} определяется отношением удлинения Δl к первоначальной длине образца l_0 : $\varepsilon_{eng} = \Delta l/l_0$. Продольная истинная деформация определяется как отношение малого удлинения dl к постоянно изменяющейся длине l : $d\varepsilon_{true} = dl/l$. В расчетах используют следующую формулу:

$$\varepsilon_{true} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (2)$$

Связь между истинными и инженерными напряжениями, а так же их деформаций, при условии однородного линейного напряженного состояния описывается следующими соотношениями: $\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon)$, $\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng})$.

Эти соотношения применимы для несжимаемого материала. При условии малых деформаций отличий между значениями инженерных и истинных параметров нет. Однако при увеличении деформаций эти значения расходятся.

Условимся все упоминаемые далее напряжения и деформации рассматриваются как истинные.

2.1 Результаты испытаний образцов из поликарбоната.

2.1.1 Поликарбонат Lexan 940A.

Геометрические размеры образцов для испытания на растяжение регламентируется в ГОСТе 11262-80. Для испытаний применяют образцы типа, представленного на рис. 2.4, форма и размеры которых указаны в табл.1.

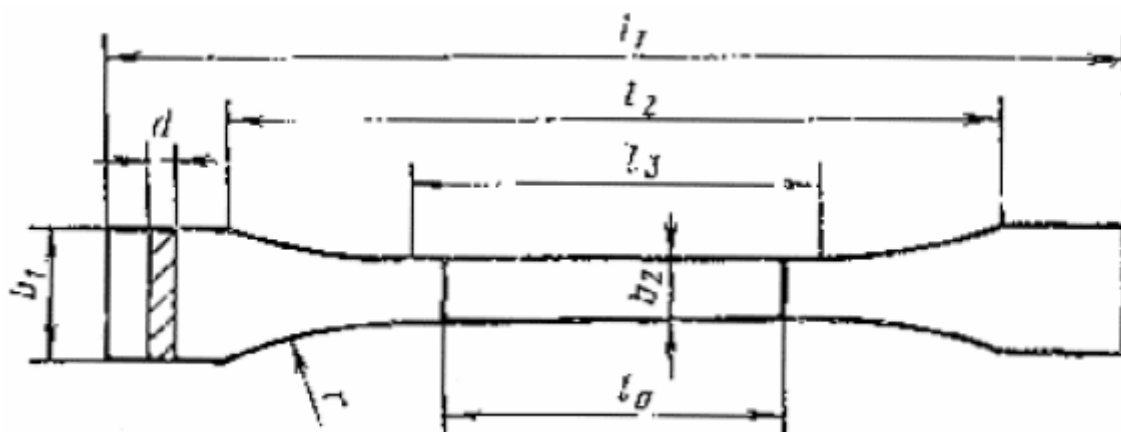


Рис. 2.4. Чертеж испытательных образцов

Табл.1 Геометрические размеры образца

Параметр	Размеры, мм
Общая длина l_1 , не менее	150
Расстояние между метками, определяющими положение кромок зажимов на образце l_2	115 ± 5
Длина рабочей области l_3	$60 \pm 0,5$
Расчетная длина l_0	$50 \pm 0,5$
Ширина головки b_1	$20 \pm 0,5$
Ширина рабочей области b_2	$10 \pm 0,5$
Толщина d	$4 \pm 0,4$
Радиус закругления, не менее r	60

Режим, способ и тип изготовления образцов должны соответствовать нормативно-технической документации на материал. Для испытаний были использованы сплошные образцы и образцы с отверстиями 3,15 мм и 4,6 мм, геометрические размеры которых производились исходя из требования ГОСТа. Фотография для образцов из поликарбоната Lexan 940А до испытания представлена на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Образцы до испытаний.

Из нормативно-технической документации на материал допускается определение удлинения образца по измерению расстояния между зажимами. Использование навесного экстензометра для измерения деформации имеет ограничение, т.к. он позволяет снимать измерения с базовой длиной 50мм. Исходя из того, что экстензометр имеет ограничения, регистрировались данные с траверсы, что допускается в нормативных документах. В результате испытаний сплошных образцов были построены кривые напряжение – деформация при одноосном растяжении. Нижний захват испытательной машины был неподвижен, в то время как верхний захват растягивал испытуемый образец. На диаграмме ниже показаны результаты для трех образцов. Можно заметить, что после упругого участка у материала следует небольшой участок пластических деформаций.

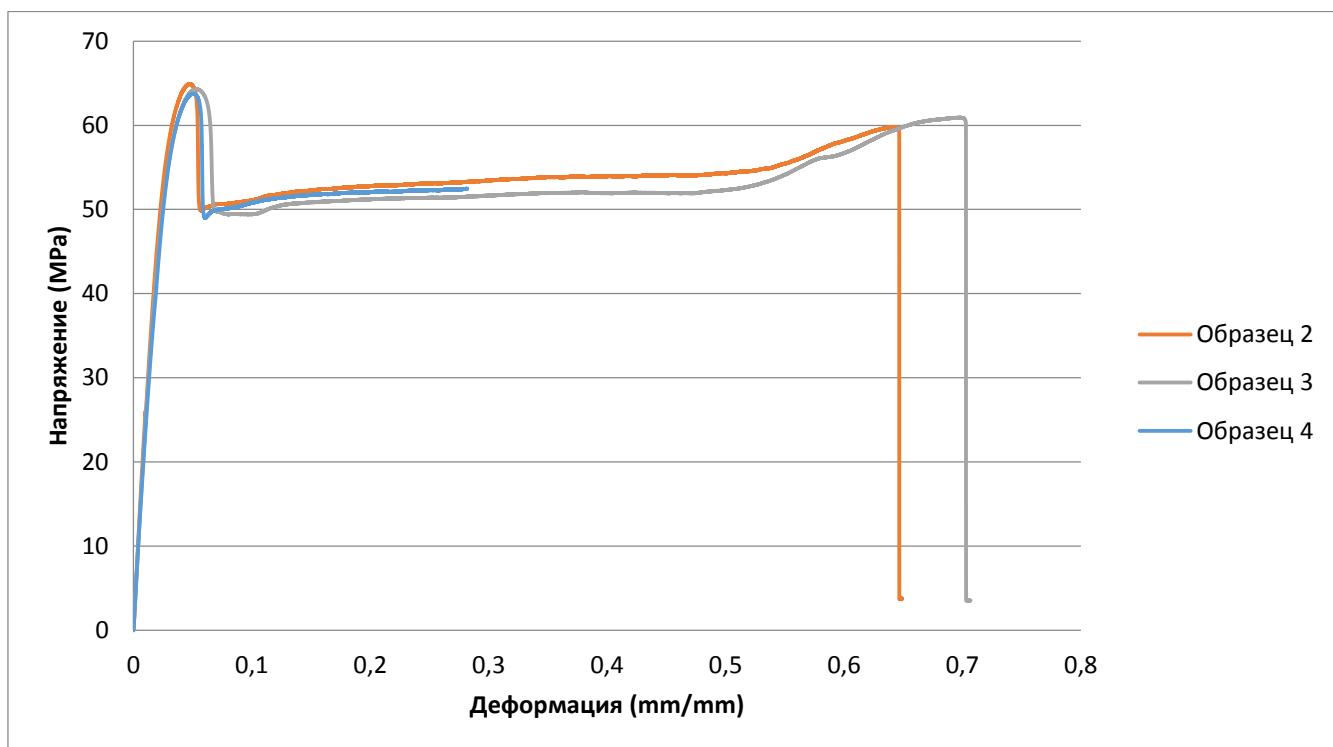


Рис. 2.6. Lexan 940A, диаграммы напряжение-деформация. Данные с траверсы.

После достижения напряжением значения ~ 65 МПа, происходит резкое разупрочнение материала, при котором напряжение резко падает до значения ~ 50 Мпа. При этом на образце визуально появляется перешеек, отличающийся по цвету и структуре от остального образца. Далее перешеек начинает расти, постепенно распространяясь на весь образец. При этом продольные деформации сильно увеличиваются, практически без изменения напряжения. Данный процесс очень напоминает процесс развития текучести у пластичных сталей.



Рис. 2.7. Распространение перешейка и окончательное разрушение.

После того как перешеек распространяется на весь образец, следует небольшая область упрочнения, где дальнейший рост деформаций сопровождается ростом напряжений, после чего происходит быстрое разрушение с образованием трещины.

Данные с траверсы показывают поведение материалы при постепенном увеличении нагрузки с момента образования шейки до полного разупрочнения материала, то есть до его разрыва. Однако, практический интерес составляет область до предела текучести. На рис. 2.8 показано сравнение данных с тензометра и с траверсы. Можно заметить, что регистрируемые данные не совпадают. Как было сказано выше, при перемещении траверсы, происходит деформация как рабочей области испытуемого образца, так и его концевых участков, захватов, нагружающей рамы и механизма, поэтому для измерения деформации непосредственно на образце используем тензометр. Он позволяет регистрировать данные в области нашего интереса.

Исходя из этого на рис. 2.9 представлены данные с тензометра. В связи с тем, что перешеек обычно образуется выше области тензометра, в момент его появления тензометр показывает уменьшение деформации,

сопровождается уменьшением напряжения. Таким образом, данные тензометра имеют смысл только до момента образования перешейка.

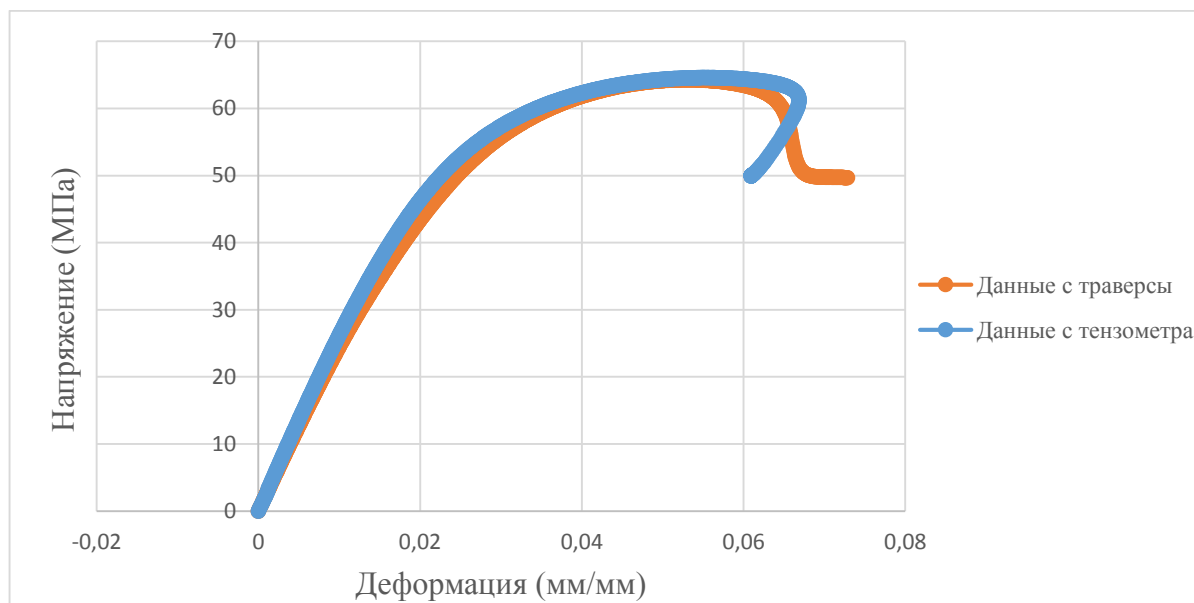


Рис. 2.8. Lexan 940A, диаграммы напряжение-деформация. Сравнение данных тензометра и траверсы.

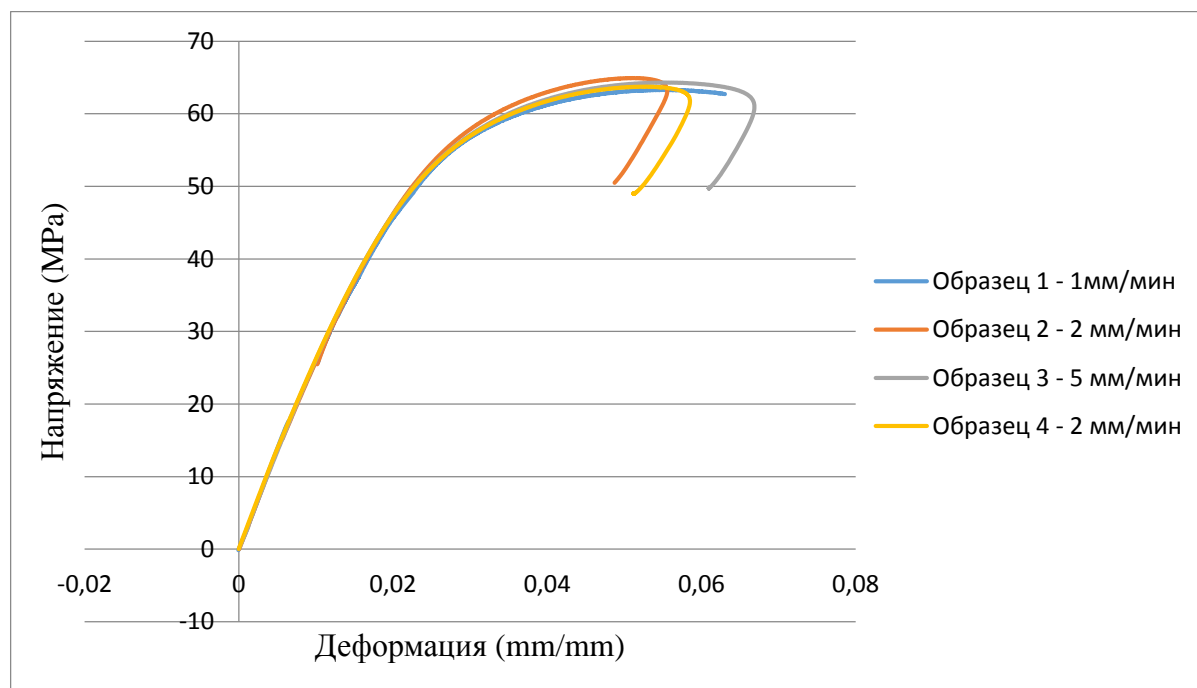


Рис. 2.9. Lexan 940A, диаграммы напряжение-деформация. Данные с тензометра.

Материал имеет хорошо выраженный линейный участок, по которому можно определить модуль Юнга графическим способом. Данный способ

определения модуля Юнга проводится по начальному участку диаграммы растяжения, которая получена от электрического измерителя, в нашем случае – с тензометра. Удлинение определяется на участке, равном базе измерителя деформации и составляет 50 мм.

Данная методика позволяет определить модуль Юнга для исследуемого материала (рис. 2.10).

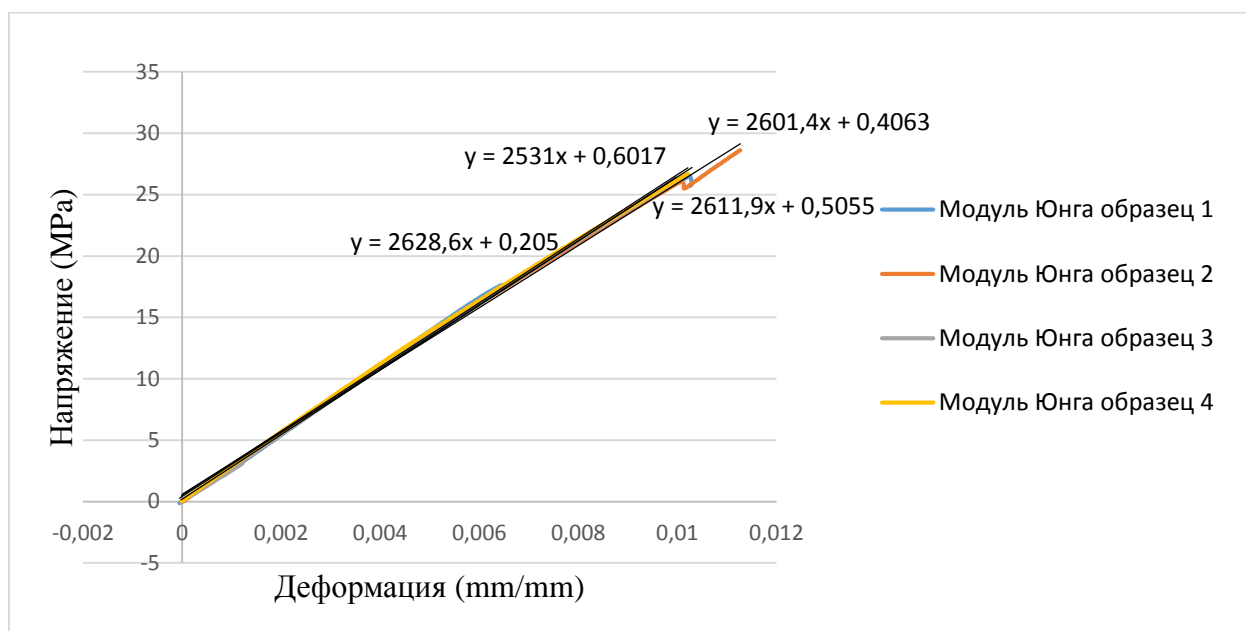


Рис. 2.10. Lexan 940A, определение модуля Юнга.

По полученным данным модуль Юнга получается равным $2600 \text{ МПа} \pm 10\%$, при значении, даваемом производителем 2240 МПа .

Также были испытаны два образца с отверстиями 3,15 мм и 4,6 мм. Результаты показаны на диаграмме ниже.

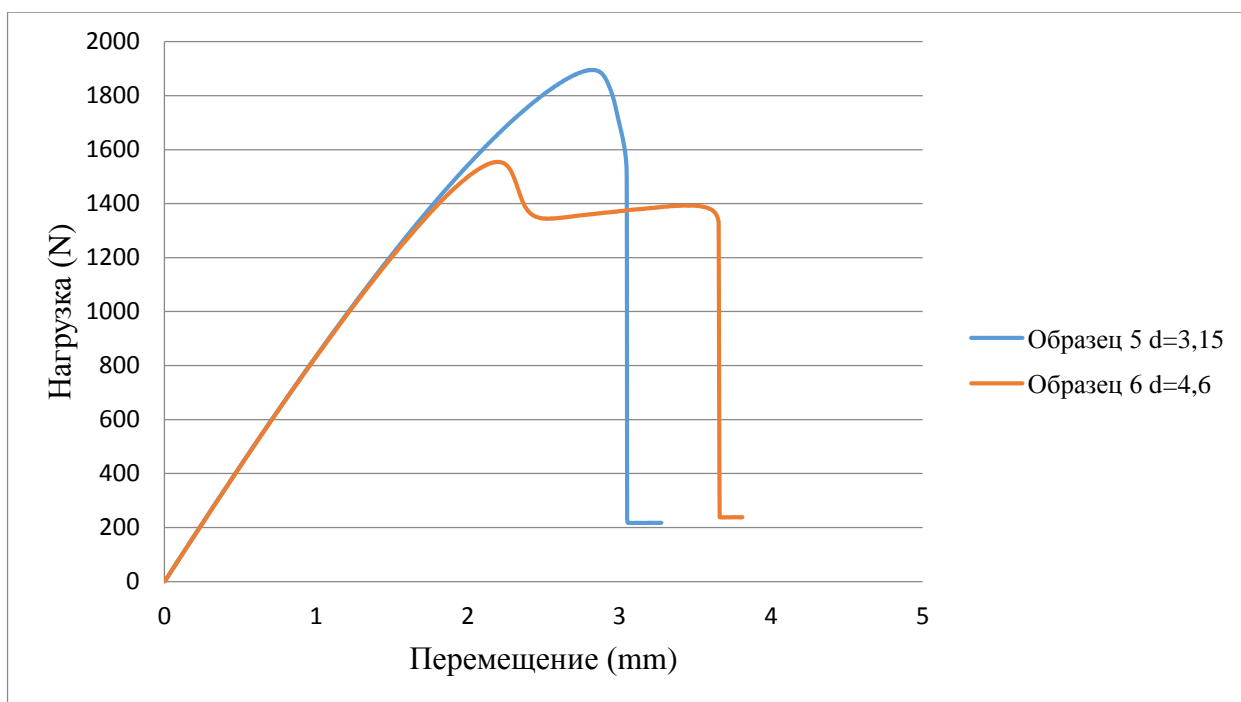


Рис. 2.11. Lexan 940A, результаты испытаний образцов с отверстиями.

Можно заметить, что увеличение диаметра отверстия (с соответствующим уменьшением толщины оставшейся части) почти в полтора раза привело к уменьшению предельной нагрузки на 20%. Из полученных результатов можно сделать вывод, что для прочности материала крайне важную роль играет наличие концентратора напряжений.

2.1.2 Поликарбонат Lexan 3412R.

Были проведены испытания образцов из поликарбоната Lexan 3412R. Геометрические размеры образцов соответствуют нормативным документам и были представлены в табл. 1. Фотография испытательных образцов до испытаний и после представлена на рис. 2.12.



Рис. 2.12. Образцы из Lexan 3412R до и после испытаний.

Поведение данного материала с первоначального момента растяжения до разрыва отличается от предыдущего материала. Отличие можно увидеть на рис. 2.12, где разрыв образца осуществляется без образования перешейка. Сравнение данных с траверсы и тензометра представлено на рис. 2.8, поэтому далее будем использовать только данные с тензометра. Полученные данные приведены на рис. 2.13 ниже.

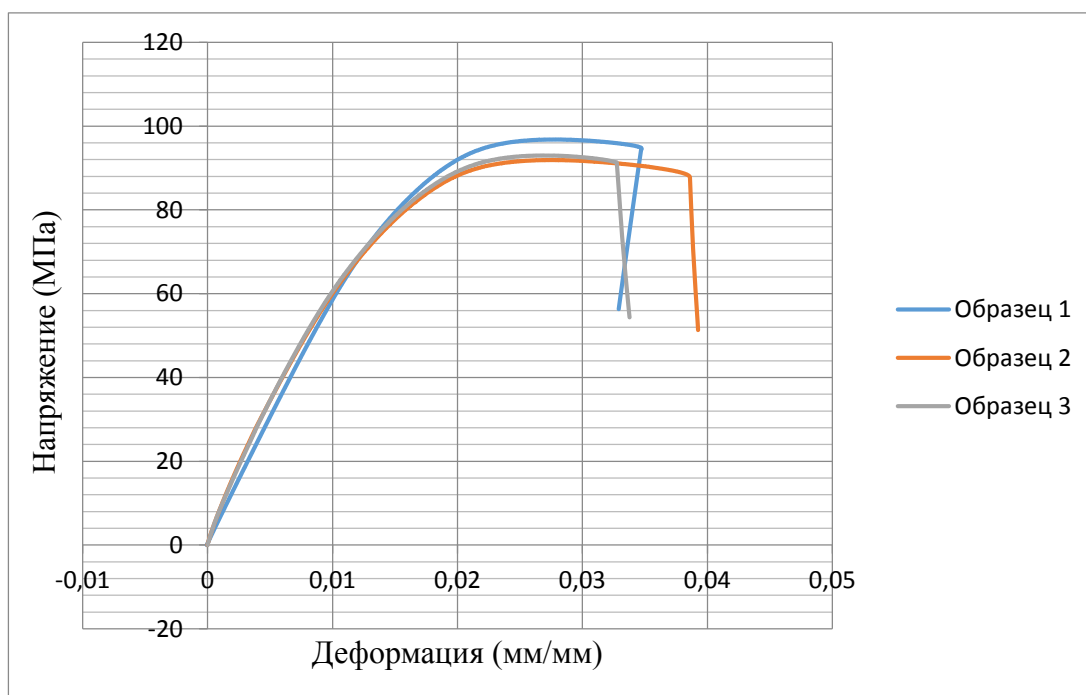


Рис. 2.13. Lexan 3412R, диаграммы напряжение-деформация. Данные с тензометра.

После испытаний было замечено, что один из образцов имеет несколько отличную внутреннюю структуру, что хорошо видно на торце разломов испытанных образцов. Возможно, этим вызвано небольшое отличие в результатах для разных образцов.

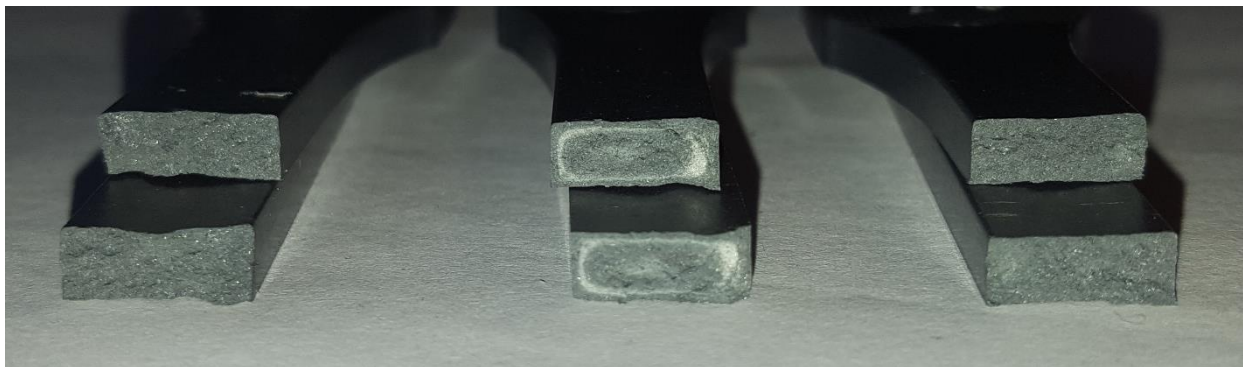


Рис. 2.14. Вид разломов образцов Lexan 3412R после испытаний.

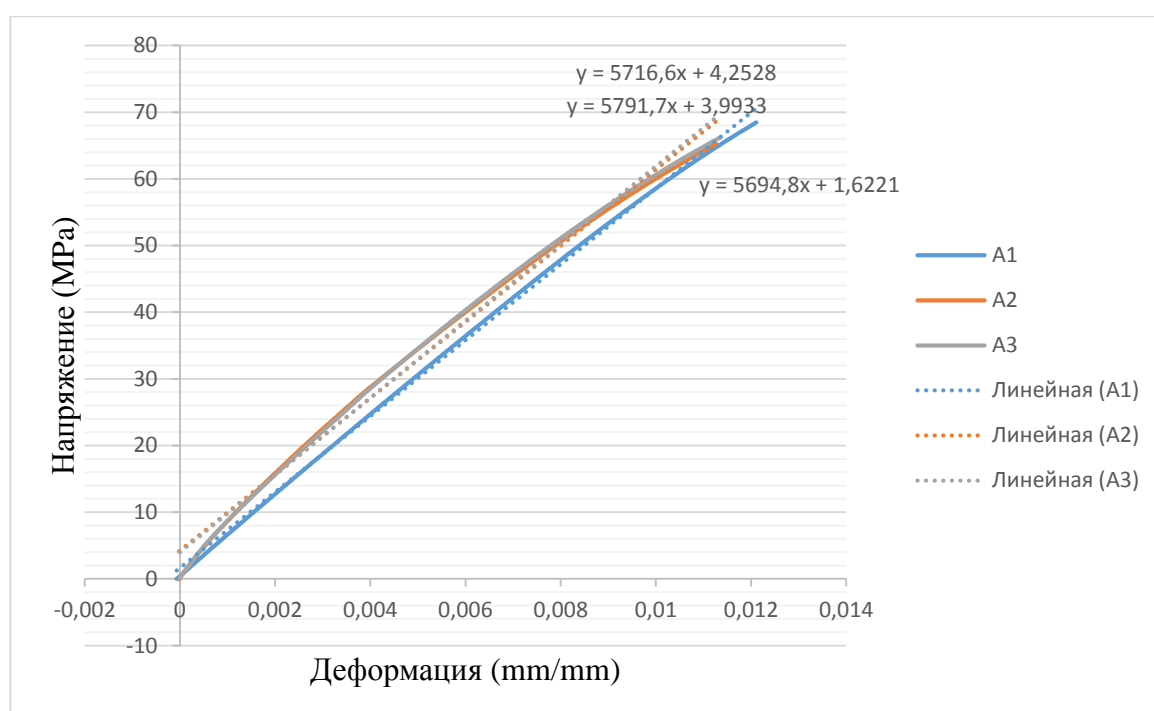


Рис. 2.15. Lexan 3412R, определение модуля Юнга.

Можно заметить, что начальный участок диаграммы растяжения имеет не четко выраженный линейный характер, поэтому использование графического метода не представляется возможным (рис. 2.15).

Данное поведение материала, где нет ярко выраженного линейного участка также оговорено в нормативных документах, а именно в ГОСТ 1497-84. В нормативном документе приведен следующий способ определения предела текучести. После того момента, когда ожидаемый условный предел текучести будет превышен, усилие, действующее на образец снижают до такой величины, чтоб оно составляла примерно 10% от уже достигнутого. Затем снова производят нагружение образца до момента, пока значение приложенного усилия не превысит первоначальную (рис. 2.16).

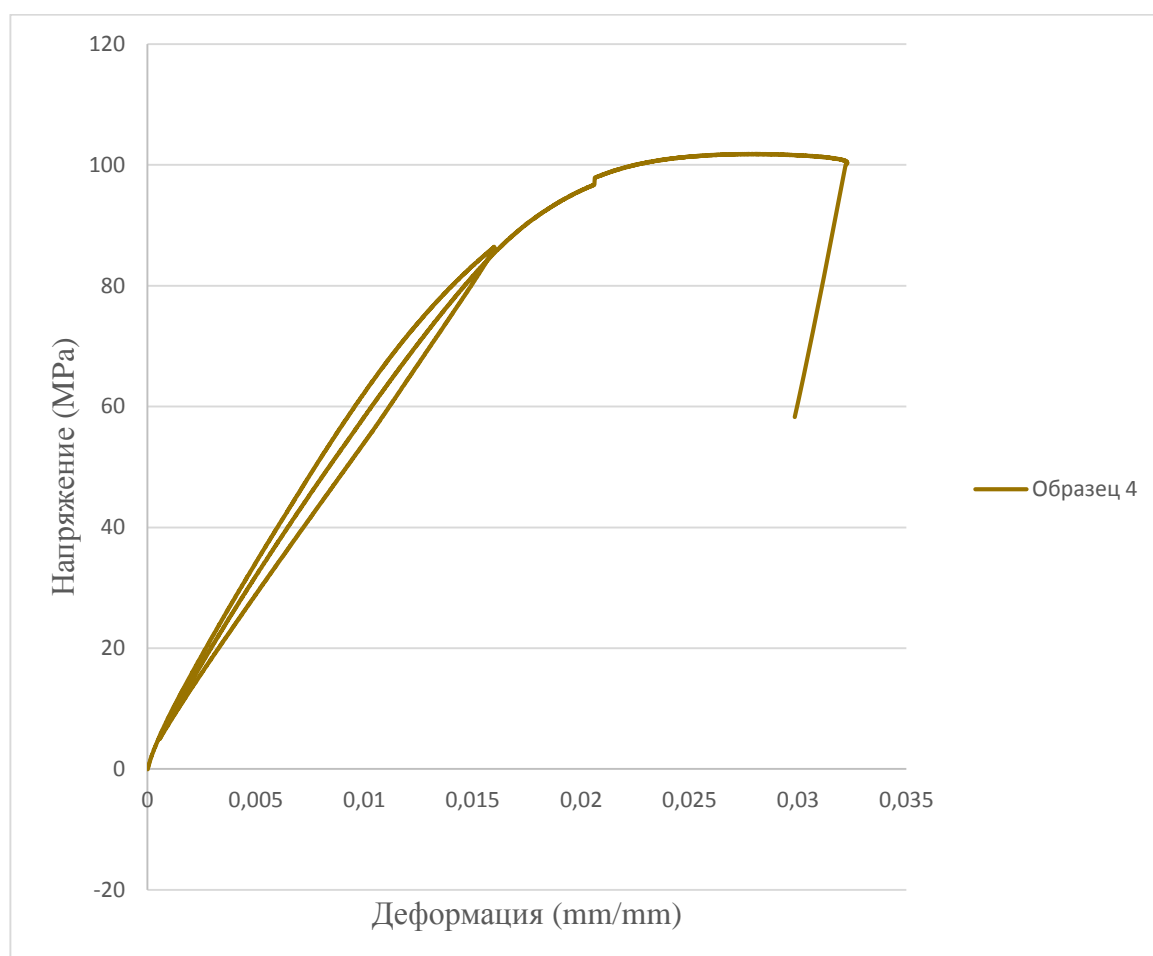


Рис. 2.16. Lexan 3412R, диаграммы напряжение-деформация. Данные с тензометра.

Полученная петля гистерезиса в ходе проведения эксперимента по схеме разгрузки определяет необходимое усилие. Для этого проводят прямую вдоль петли гистерезиса. Затем проводят параллельную ей линию, как показано на рис. 2.17. Разница по оси абсцисс между прямой вдоль петли гистерезиса и

параллельной ей соответствует допуску на величину пластической деформации. Величина усилия, которая соответствует точке пересечения этой линии с диаграммой растяжения, будет соответствовать усилию условного предела текучести при установленном допуске на величину пластической деформации [12, 13].

Для большинства материалов принято определять условные пределы упругости σ_i , где i определяют, исходя из величины допуска на пластическую деформацию, равную от 0,02% до 0,1% расчетной длины включительно по аналогии с условным пределом текучести.

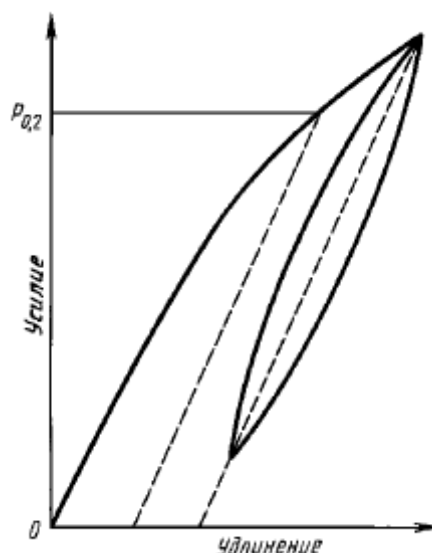


Рис. 2.17. Определение условного предела текучести по ГОСТу

На рис. 2.18 представлена диаграмма растяжения исходя из требований ГОСТа.

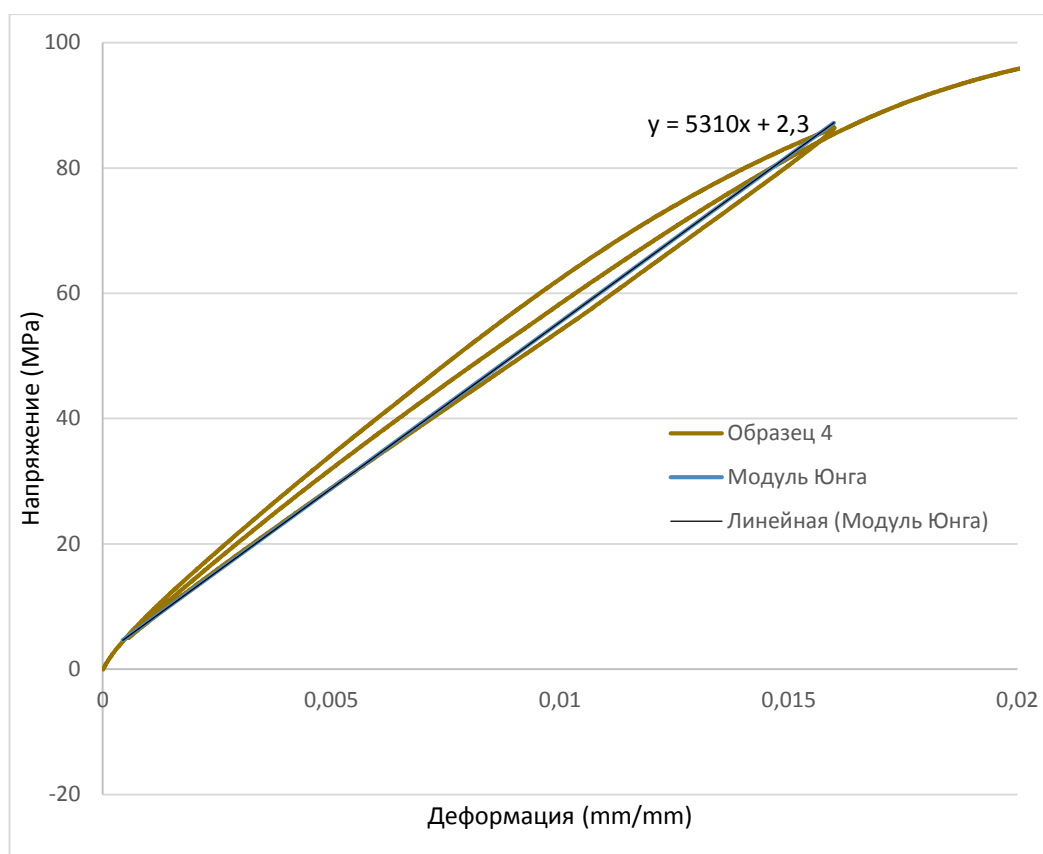


Рис. 2.18. Lexan 3412R, определение модуля Юнга по схеме разгрузки.

Можно заметить, что использование графического метода (рис. 2.15) не применимо для данного материала и дает другое значение модуля Юнга. Более точное значение модуля Юнга получено по схеме разгрузки.

По полученным данным модуль Юнга получается равным $5300 \text{ МПа} \pm 5\%$, при значении, даваемом производителем 5220 МПа .

Как и для предыдущего материала приведенные результаты показаны как для сплошных образцов, так и с отверстиями. Для данного материала были испытаны по два образца с отверстиями 2 мм и 5 мм.

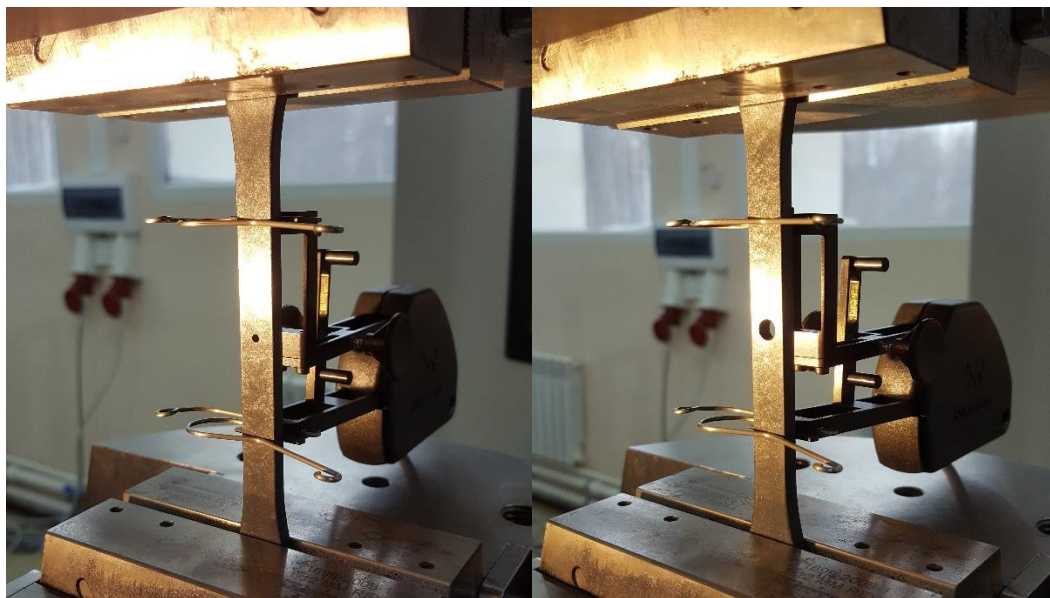


Рис. 2.19. Lexan 3412R, образцы с отверстиями.

Результаты показаны на диаграмме ниже.

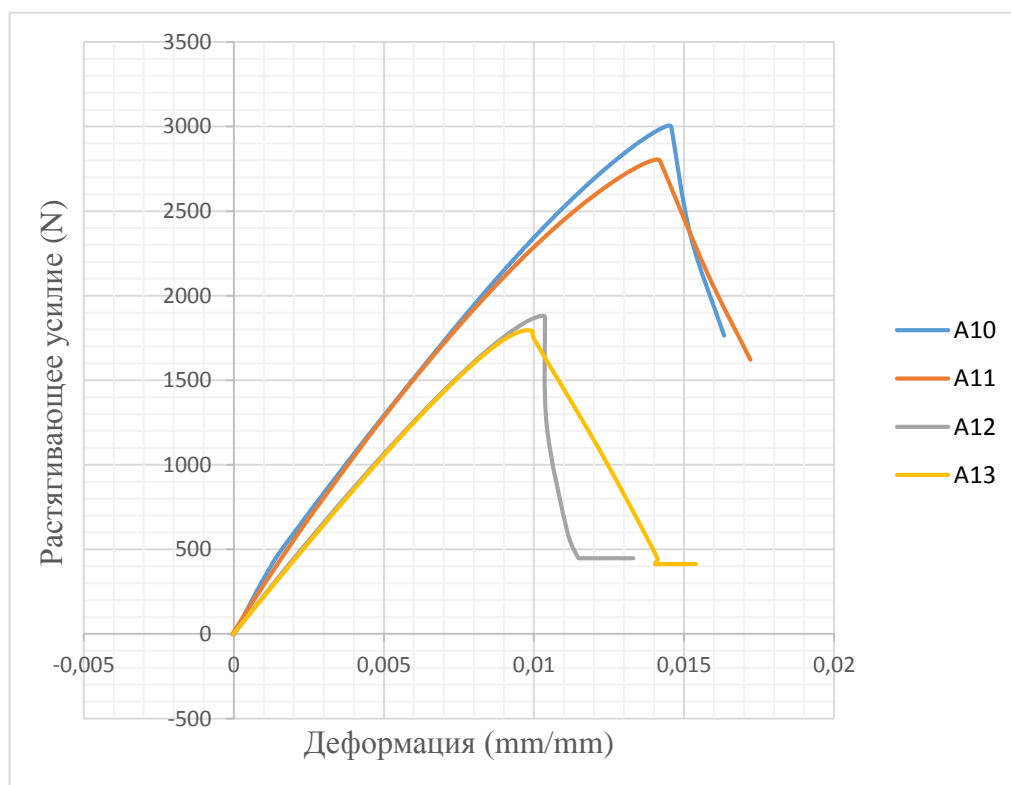


Рис. 2.20. Lexan 3412R, результаты испытаний образцов с отверстиями.

Верхние две диаграммы растяжения соответствуют образцам с диаметрами отверстия в 2 мм, а нижние, соответственно, 5 мм. Можно заметить, что образцы с меньшим диаметром отверстия способны

выдерживать нагрузки до разрыва в 1.5 раза выше, чем образцы с большим диаметром отверстия.

2.1.3 Поликарбонат Lexan 500R.

Аналогичным образом проводились испытания для образцов из Lexan 500R. Геометрические размеры образцов для испытаний соответствуют требованиям ГОСТа. Поведение материала от начала деформирования до разрушения представлено на рис. 2.21, где представлены данные с траверсы.

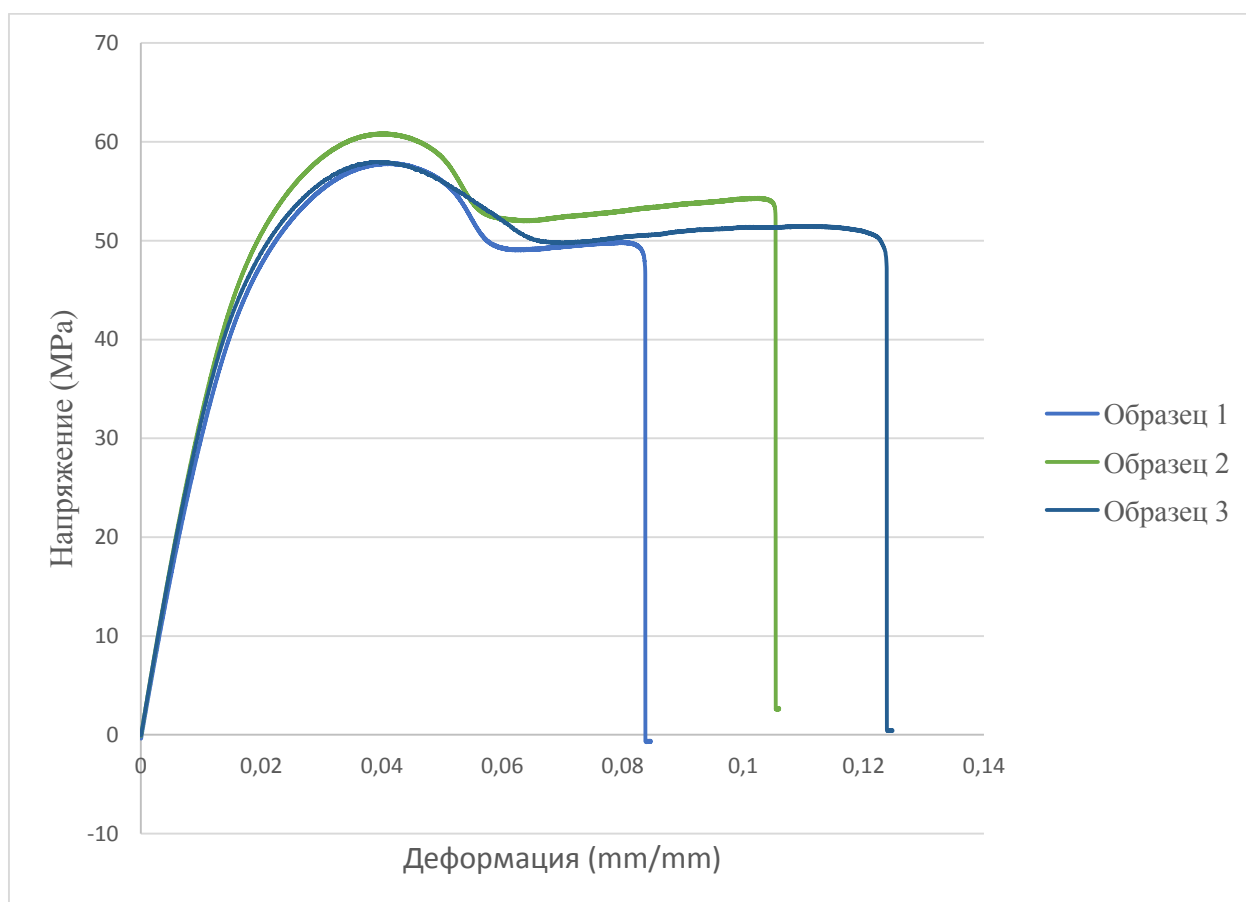


Рис. 2.21. Lexan 500R, диаграммы напряжение-деформация. Данные с траверсы.

Однако, данные с тензометра позволяют регистрировать значения деформации в области нашего интереса, то есть до предела текучести. На представленном графике видно, что материал имеет не ярко выраженный начальный линейный участок. Определение модуля Юнга, как и для предыдущего материала, необходимо вычислять по схеме разгрузки (рис. 2.22).

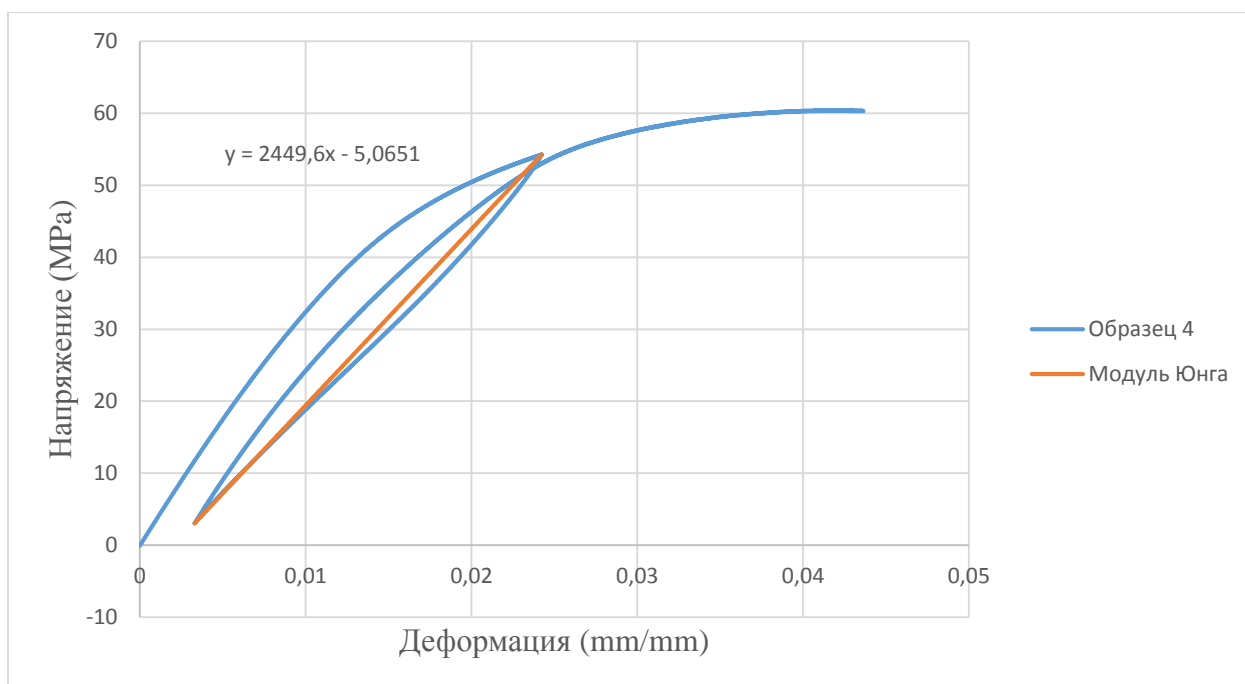


Рис. 2.22. Lexan 500R, диаграммы напряжение-деформация. Данные с тензометра.

По полученным данным модуль Юнга получается равным 2400 МПа \pm 5%, при значении, даваемом производителем 2300 МПа.

2.2 Результаты испытаний образцов из полиамида.

Все полиамиды гигроскопичны в той или иной степени и поглощают влагу, если их оставить на открытом воздухе. Из-за данного свойства гигроскопичности полиамидные материалы всегда должны быть высушены перед переработкой, чтобы гарантировать отсутствие гидролитического разложения. Это означает, что уровень содержания влаги должен быть ниже 0,2%. Коммерческие полиамидные соединения, как правило, поставляются сухими и готовыми к формованию, но если необходима сушка, это обычно достигается применением специальных сушилок. Во время сушки необходимо следить за тем, чтобы материал не обесцвечивался. Содержание влаги влияет на механические свойства материала.

Если температура сушки слишком низкая, формованные компоненты могут быть слишком хрупкими в результате внутренних напряжений. Точно

так же, если температуры слишком высокие, хрупкость и потеря характеристик материала могут быть результатом разрушения материала. Заполненные и армированные стекловолокном полиамиды имеют характеристики текучести расплава, которые необходимо учитывать для получения хорошей отделки поверхности. Как правило, эти материалы являются намного более вязкими, чем ненаполненные полиамиды.

Необходимо выяснить как зависят механические свойства материала от количества влаги в образце. Для исследования использовались образцы двух видов. Одни из них сухие образцы, которые были кондиционированы не менее 12 часов при температуре 80 °С, что соответствует нормативно-технической документации на материал, если нет других указаний. Другие влажные, которые находились в сосуде с водой около 80 часов при температуре 80-90 °С.

2.2.1 Полиамид Armamid PASV30.

30-% стеклонаполненный термостабилизированный полиамид 6. Характеризуется повышенными значениями механических и электрических свойств, устойчив к действию углеводородов (керосина, бензина, дизельного топлива, бензола и т.д.), минеральных и синтетических масел, концентрированных и слабых щелочей, слабых кислот.

Измерения геометрических размеров для трех образцов были проведены до и после испытания. Таким образом проводились измерения для сухих и влажных образцов соответственно. Измерялись такие размеры как ширина и толщина рабочей области, масса образца. Замеры по проводились перед испытанием и после 80 часов кипячения. Результаты полученных измерений приведены в табл. 2.

Табл. 2 Средние параметры образца

Ширина рабочей области, мм		Толщина рабочей области, мм		Масса, г		
до	после 80 ч.	до	после 80 ч.	до	после 50 ч.	после 80 ч.
9,76	9,88	3,97	4,01	9,88	10,33	10,33
$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$

Можно заметить, что размеры испытательных образцов в ходе кипячения изменились на 5%.

Образцы двух видов были экспериментально исследованы. В ходе проведения испытания были получены диаграммы растяжения. На рис. 2.23 представлена диаграмма для сухих образцов. Для определения модуля Юнга один из сухих образцов был нагружен и разгружен, по схеме разгрузки, по требованиям ГОСТа, которые были изложены выше.

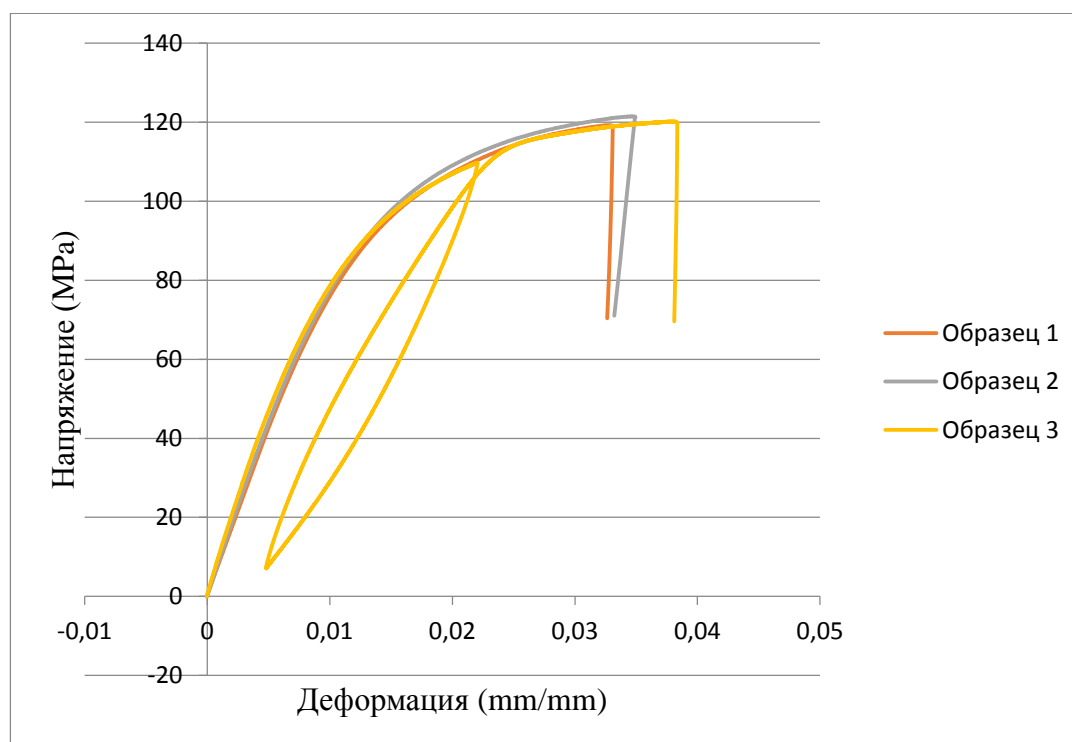


Рис. 2.23. Aramid PASV30, диаграммы напряжение-деформация. Данные с тензометра.

Аналогично тому, как были испытаны сухие образцы, испытания проводились для влажных образцов. На рис. 2.24 представлены диаграммы растяжения для трех образцов.

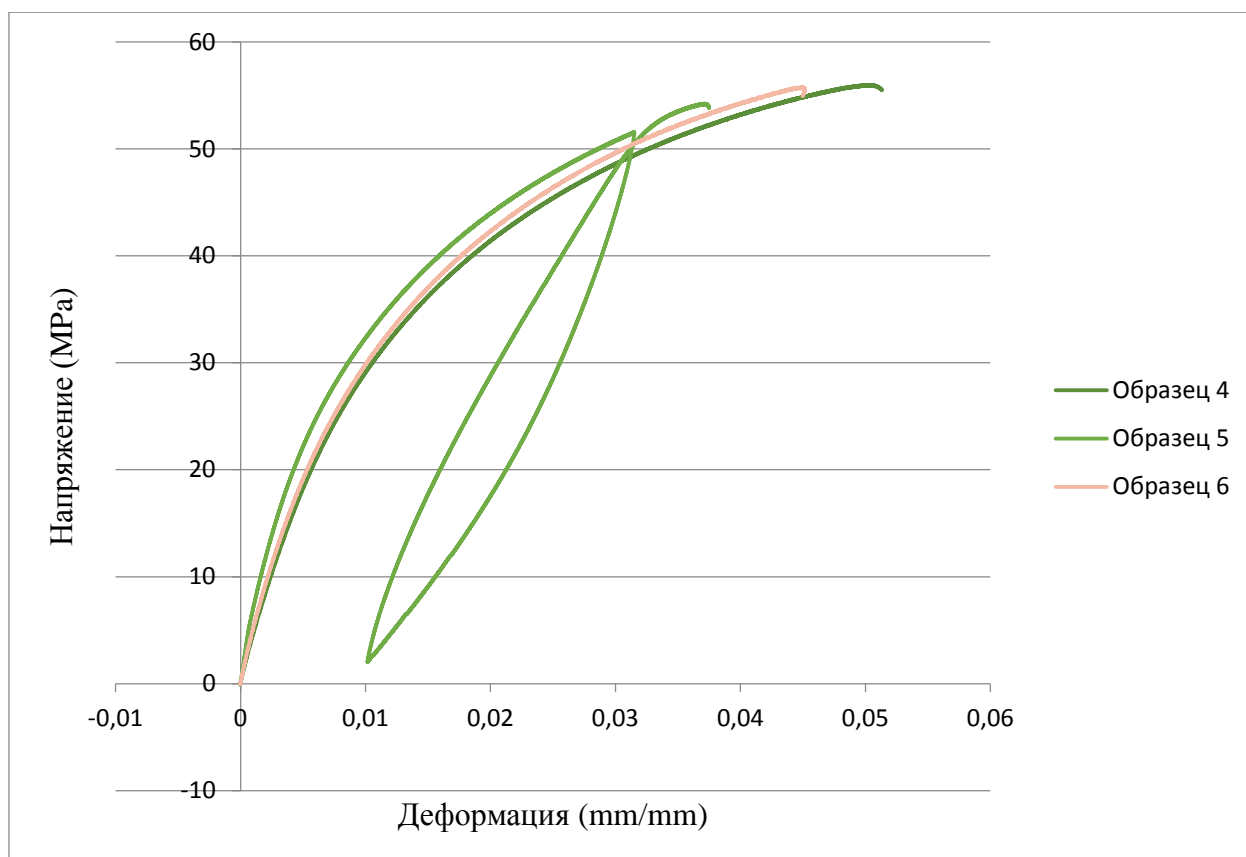


Рис. 2.24. Aramid PASV30, диаграммы напряжение-деформация. Данные с тензометра.

На основе полученных данных можно сосчитать модуль Юнга. В связи с тем, что начальный участок не линейный используем петлю гистерезиса для определения модуля Юнга. Исходя из требований нормативных документов получим значения модуля Юнга для сухого образца.

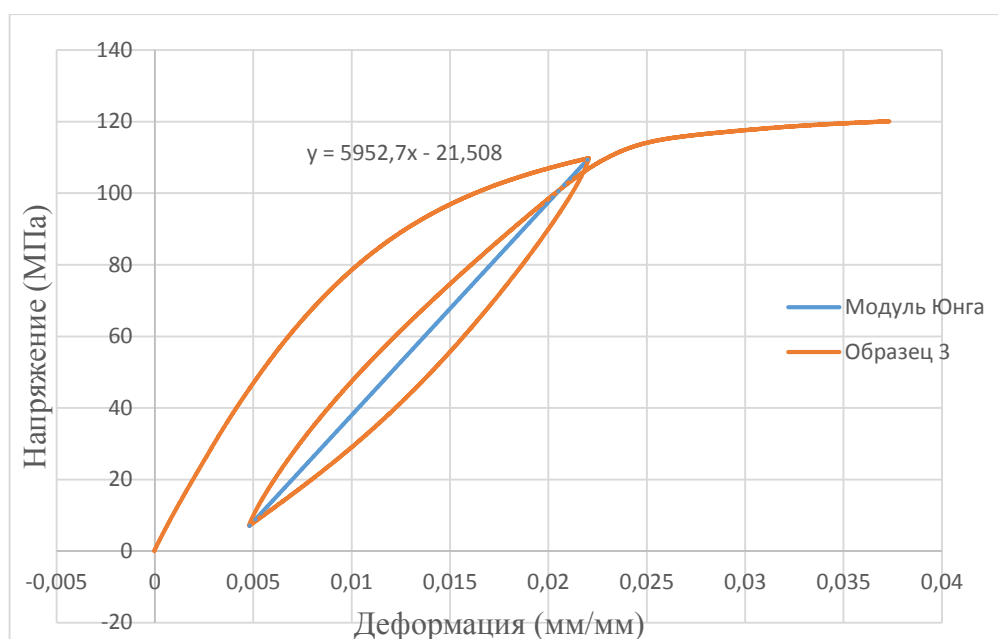


Рис. 2.25. Aramid PASV30, диаграммы напряжение-деформация. Данные с тензометра.

По полученным данным модуль Юнга получается равным 5900 МПа \pm 5%.

Получим модуль Юнга для образца № 5, который является влажным образцом. На рис. 2.26 представлена диаграмма растяжения и полученное значение модуля Юнга.

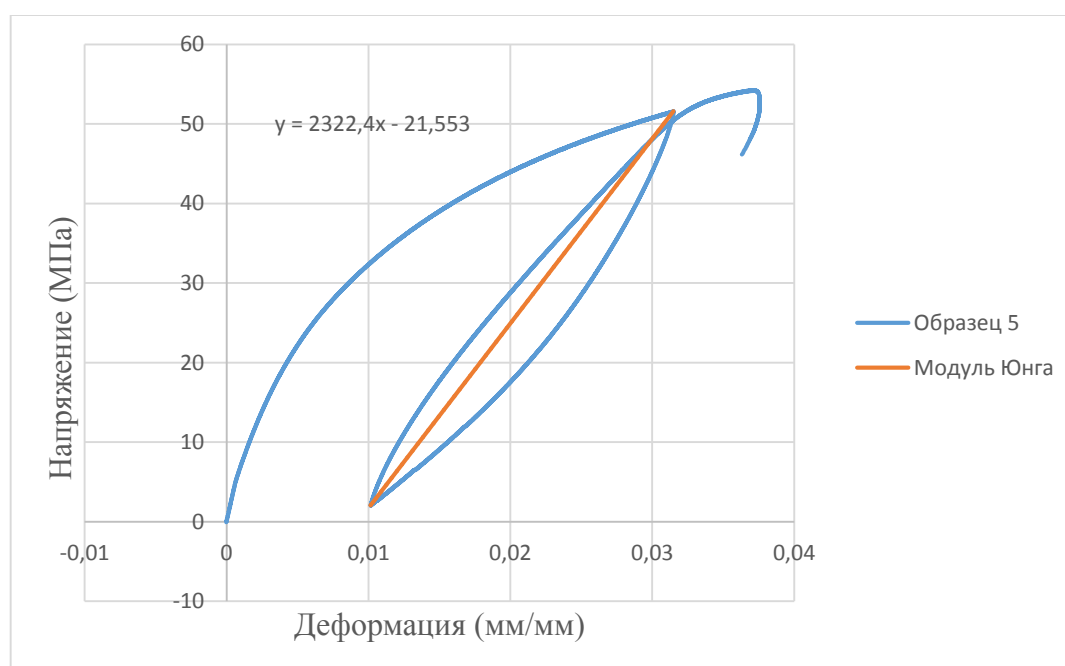


Рис. 2.26. Aramid PASV30, диаграммы напряжение-деформация. Данные с тензометра.

По полученным данным модуль Юнга получается равным $2300 \text{ МПа} \pm 5\%$.

Исходя из полученных данных в ходе испытания образцов двух видов, можно заметить, что сухие образцы выдерживают нагрузку в 1.5 раза больше, чем влажные.

2.2.2 Полиамид Tehnamid PA66

Полиамид сочетает высокую механическую прочность с эластичностью в широком диапазоне температур, антифрикционные свойства, высокое усталостное сопротивление и небольшую ползучесть. Технамид используется для изготовления ответственных деталей, работающих в условиях повышенных механических нагрузок.

Образцы данного материала исследовались аналогичным образом. Использовались образцы двух типов: сухие и влажные. Методика кондиционирования сухим образцов не отличается от образцов предыдущего материала, так же, как и кипячение образцов. Геометрические размеры образцов данного материала измерялись до и после кипячения. В ходе полученных измерений данный материал впитал в себя в ходе кипячения 5% влаги, что соответствует таким же показателям для предыдущего материала.

Представим диаграмму растяжения для сухих и влажных образцов на одном графике.

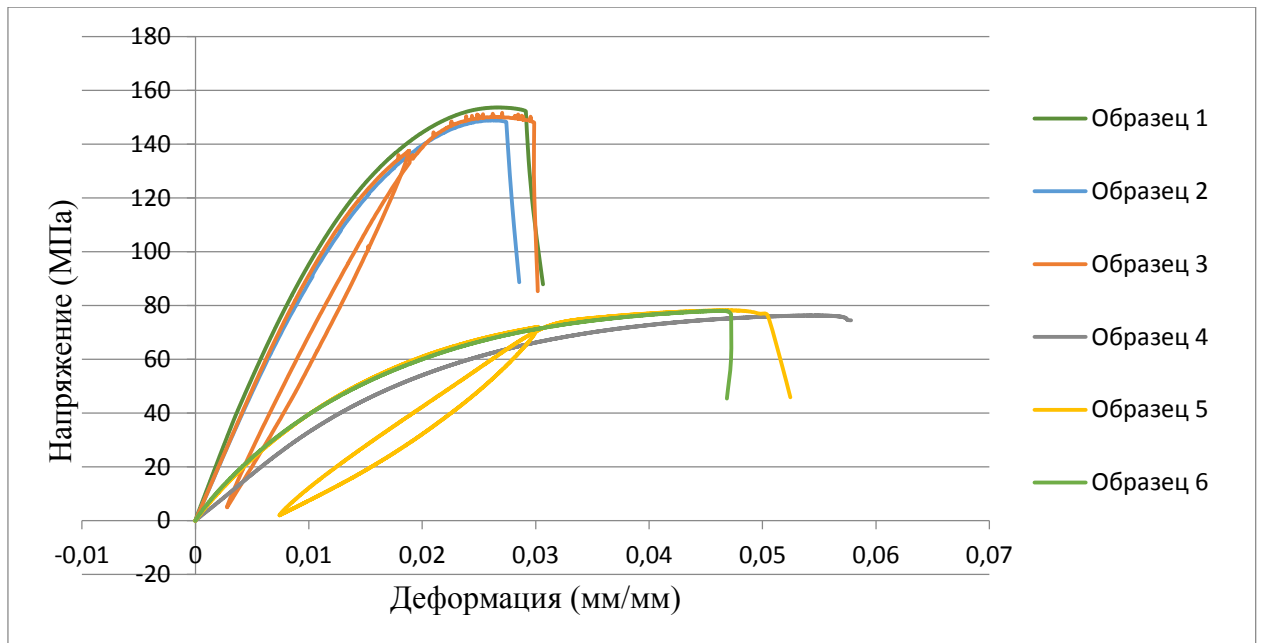


Рис. 2.27. *Technamid PA66*, диаграммы напряжение-деформация. Данные с тензометра.

Можно заметить, что образцы 1,2,3, которые соответствуют сухим образцам, способны выдерживать усилия нагрузки в 2 раза выше, чем влажные образцы. Исходя из полученных диаграмм растяжение для образцов под номерами 3 и 5 найдем модули Юнга.

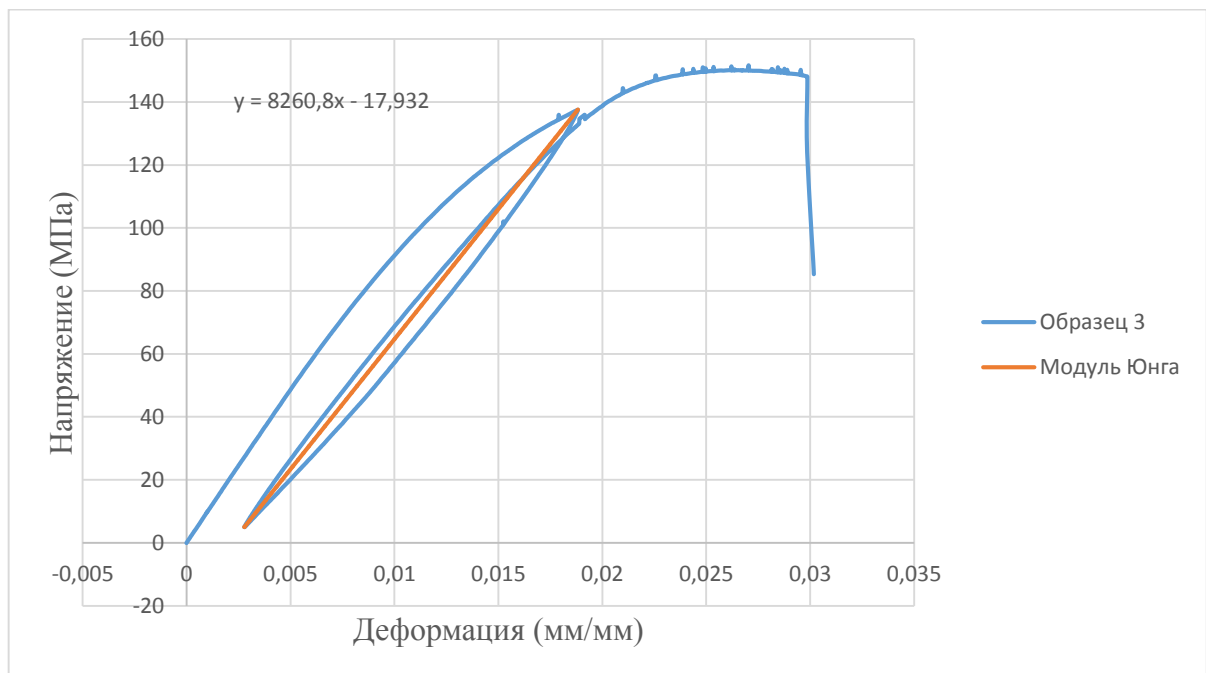
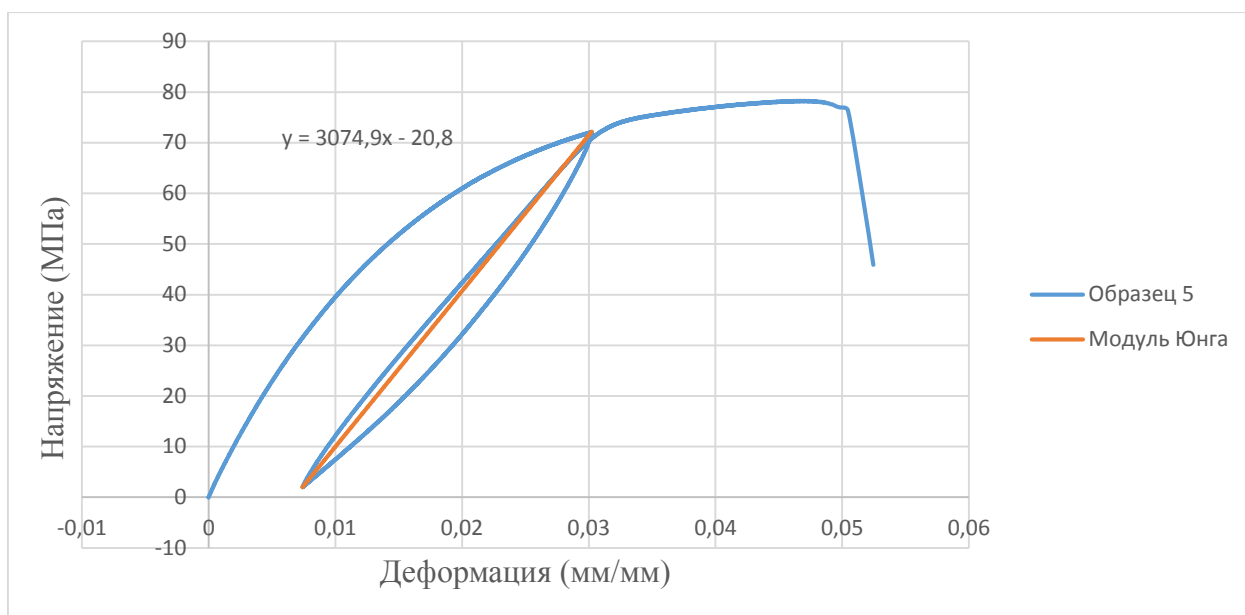


Рис. 2.28. *Technamid PA66*, диаграммы напряжение-деформация. Образец №3. Данные с тензометра.



*Рис. 2.29. Technamid PA66, диаграммы напряжение-деформация. Образец №5.
Данные с тензометра.*

По полученным данным для сухого образца модуль Юнга получается равным $8200 \text{ МПа} \pm 5\%$, а для влажного образца - $3000 \text{ МПа} \pm 5\%$.

2.2.3 Полиамид BASF B3ZG3

Данный полиамид является ударопрочным, армированный стекловолокном для литья под давлением. Применяется для технических деталей очень высокой жесткости и прочности.

Образцы из данного материала испытывались на одноосное растяжение, аналогично предыдущим испытаниям на другие материалы. Для испытаний использовались образцы двух видов. Измерения геометрических размеров проводилось до и после кипячения. Влажные образцы впитали влагу около 5 %, что соответствует результатам для образцов других полиамидов.

На основании проведенных испытаний получены диаграммы растяжения для сухих и влажных образцов. Результаты приведены на рис. 2.30. На данном графике уже проведены модули Юнга для образцов двух видов.

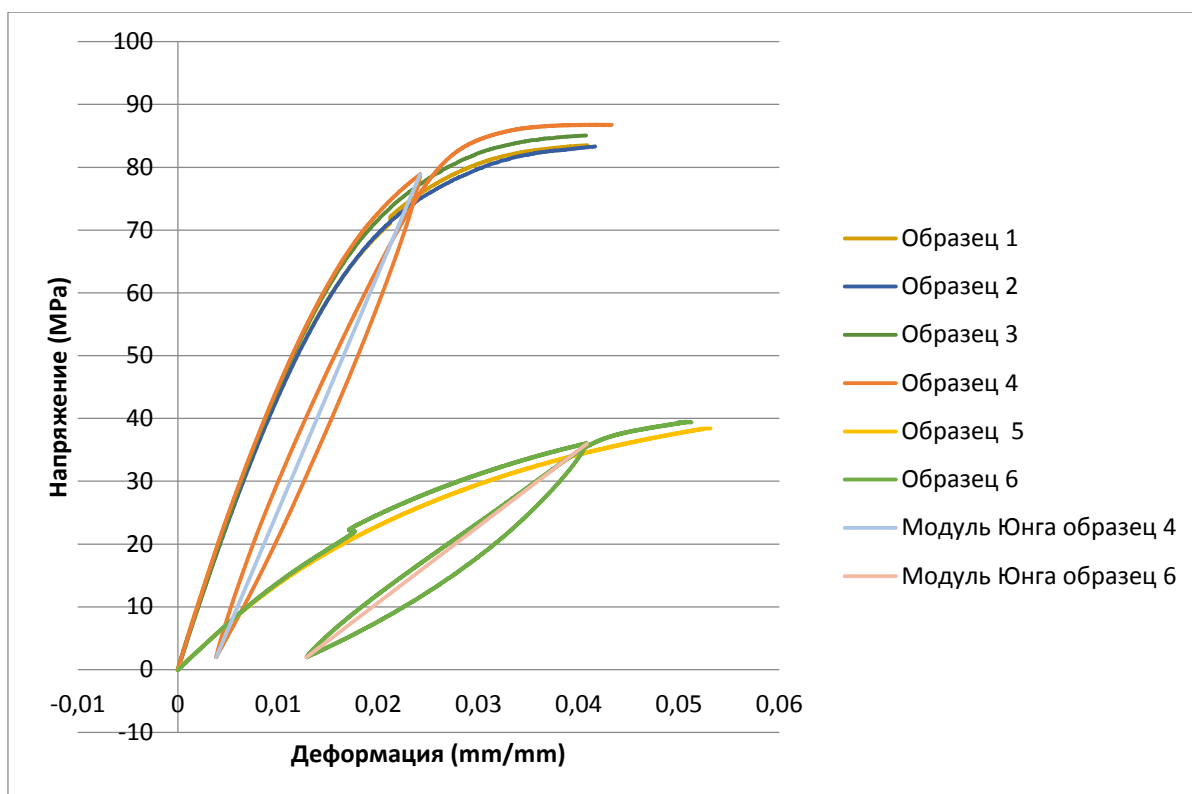


Рис. 2.30. BASF B3ZG3, диаграммы напряжение-деформация. Данные с траверсы.

По полученным данным для сухого образца модуль Юнга получается равным $3700 \text{ МПа} \pm 5\%$, а для влажного образца - $1200 \text{ МПа} \pm 5\%$.

2.2.4 Полиамид Poliamid PA610 SV30

Данный материал представляет собой синтетический полимер с превосходными физико-химическими свойствами. Сравнивая данную марку полиамида с другими можно выделить следующие отличительные свойства:

- низкий коэффициент влагопоглощения;
- высокие электроизоляционные свойства;
- отличная размерная стабильность материала;
- низкая подверженность температурным деформациям;
- высокие антифрикционные свойства;
- высокая масло– и бензостойкость.

Стеклонаполненные полиамиды отличаются повышенной прочностью, устойчивостью к ударным нагрузкам.

Образцы из данного материала испытывались на одноосное растяжение, аналогично предыдущим испытаниям на другие материалы. Для испытаний использовались образцы двух видов. Измерения геометрических размеров проводилось до и после кипячения. Влажные образцы впитали влагу около 5 %, что соответствует результатам для образцов других полиамидов.

На основании проведенных испытаний получены диаграммы растяжения для сухих и влажных образцов. Результаты приведены на рис. 2.31.

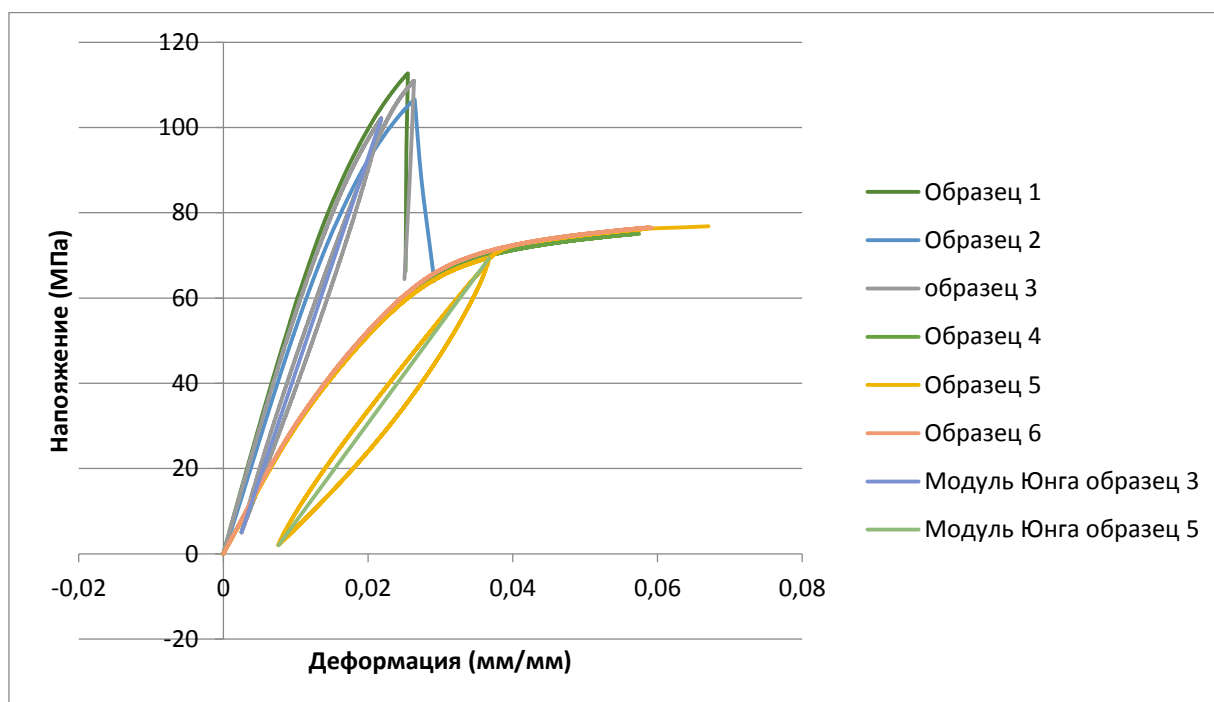


Рис. 2.31. Poliamid PA610 SV30, диаграммы напряжение-деформация.

Данные с траверсы.

По полученным данным для сухого образца модуль Юнга получается равным $5000 \text{ МПа} \pm 5\%$, а для влажного образца - $2300 \text{ МПа} \pm 5\%$.

2.3 Выводы

1. Материал поликарбонат Lexan 940A ведёт себя упругопластическим образом, что позволяет использовать графический метод нахождения предела пропорциональности, т.к. диаграмма имеет начальный линейный участок.

2. Другие поликарбонаты и полиамиды не имеют начального линейного участка, что позволило использовать нагрузку и разгрузку по схеме нагружения.

3. Все полиамиды в ходе кипячения набрали воды не более 5 % от начальной массы. Влажные образцы способны выдерживать нагрузки в 1,5-2 раза выше, чем сухие образцы.

4. Модуль Юнга для сухих полиамидов варьируется от 3700 до 8200 МПа, а для влажных от 1200 до 3000 МПа.

3. Численный расчет одноосного растяжения

Методика численного расчета представляет собой довольно мощный инструмент для изучения распространения напряженного состояния вдоль всего образца.

Как уже было указано выше, полученные экспериментальные данные по свойствам поликарбоната Lexan 500R и всем полиаидам не укладываются в общепринятое описание поведения упруго-пластичных материалов. В частности, на диаграмме отсутствует начальный линейный участок, а сама диаграмма лежит выше прямой соответствующей модулю Юнга (измеренному при помощи разгрузки образца и совпадающему с данными из справочников). Аналогично можно отметить, что ни одна из моделей материала, используемых в ANSYS не позволяет описывать подобное его поведение.

На сегодняшний день можно предложить два варианта решения подобной задачи. В литературе можно найти описание различных материалов, не имеющих начального линейного участка [14]. В последнем случае при выполнении инженерных расчетов при малых деформациях вводят понятие секущего модуля, равного тангенсу угла наклона секущей, проведенной из начальной точки диаграммы. Таким образом можно использовать модуль Юнга, измеренный при разгрузке образца, в качестве секущего модуля. В этом

случае все значения кривой напряжение-деформация лежащий выше прямой, соответствующей модулю Юнга приравниваются к нему. При этом необходимо понимать, что добиться хорошего соответствия с экспериментом в области малых деформаций не получится.

Вторым вариантом является задание искусственного модуля Юнга, лежащего выше экспериментальной кривой. При этом линейный участок сокращается в несколько раз и практически все деформации будут интерпретироваться как пластические. В таком случае нужно понимать, что адекватные результаты расчета будут получаться только при монотонно возрастающей нагрузке. Значение остаточных деформаций при снятии нагрузки будет рассчитываться неверно.

Плюсом данного метода является то, что мы задаём всю экспериментальную кривую. И описываем упругий участок по экспериментальной кривой, т.о. полные деформации мы считаем правильно всегда.

В данной главе предложена методика численных расчетов упругопластического деформирования на основе экспериментальных данных. Экспериментальное исследование проводилось для образцов различных материалов и геометрии, как сплошной, так и с отверстиями. Это связано с тем, что сплошные образцы характеризуются одноосными однородными напряжениями. Экспериментальное исследование сплошных образцов, рассмотренных выше, дает возможность получения диаграммы напряжение-деформация, которая задает поведение материала, но использовать их для верификации численной методики нецелесообразно, т.к. в них реализуются сугубо одноосные и однородные напряжения. С другой стороны, образцы с отверстиями имеют существуют более сложные виды деформаций, которые являются неоднородными и не одноосными. Образцы с отверстием как раз имеют концентраторы напряжений, на основе которых представляется возможность проверки численного решения задачи.

Таким образом, далее под первой методикой будем понимать использование секущего модуля, равному модулю Юнга, измеренного по схеме разгрузки, а под второй использование завышенного модуля Юнга, который исключает описание поведения материала в области упругих деформаций.

3.1 Математическая постановка задачи

Основные уравнения теории упругости имеют вид:

1. Дифференциальные уравнения равновесия

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2. Геометрические уравнения Коши

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3. Уравнения неразрывности

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x} \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

4. Физические уравнение Гука

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\text{где} \quad G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad \text{и} \quad \lambda = \frac{3\mu E}{1+\mu} = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} = \frac{2G\mu}{1-2\mu} \quad (8)$$

представляют собой величины, зависящие только от упругих постоянных E и μ материала, и называются *коэффициентами Ламе*.

Здесь

X, Y – объемные силы.

u, v, w – перемещения в направлениях осей координат.

ε, γ – линейная и угловая деформация.

Существуют два основных способа решения задач теории упругости: решение в перемещениях и решение в напряжениях [15].

Если задача решается в перемещениях, то необходимо геометрические уравнения (4) подставить в физические уравнения (7), а затем полученное выражение подставить в уравнения равновесия (3). Тогда получим систему из двух дифференциальных уравнений второго порядка относительно перемещений u и v . Решение полученной системы, записанным также в перемещениях, и является решением задачи в перемещениях. Деформации и напряжения определяем при помощи уравнений (4) и (7). Если задача

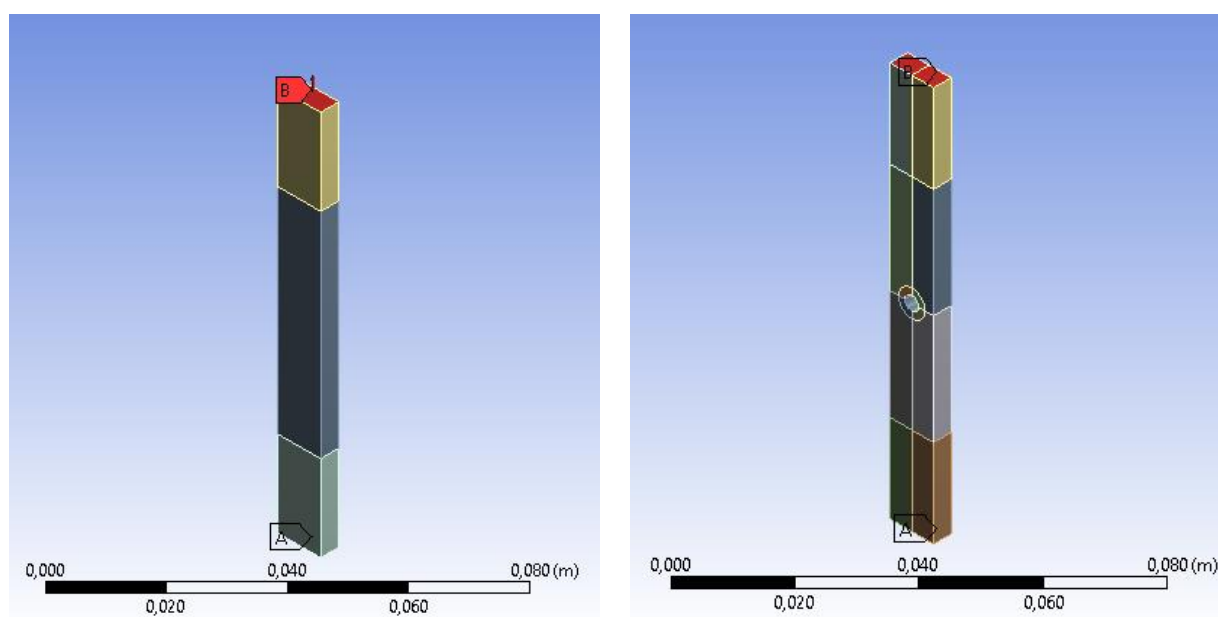
решается в напряжениях, то необходимо решать систему из трех дифференциальных уравнений: двух уравнений равновесия (3) и уравнения неразрывности деформаций в напряжениях (4). Решение этой системы уравнений и является решением задачи.

3.2 Выбор и обоснование численной модели

Для проведения численного расчета использовалась геометрия образцов в виде брусков, размеры которых соотносятся с размерами образцов для экспериментального исследования.

Вычисления проводились для образцов двух типов: сплошных образцы и образцы с отверстиями различных диаметров. Первостепенным является численное решение задачи для сплошных образцов, потому что в таком случае растяжение одноосное, что позволяет получать диаграмму напряжение-деформация. Полученная кривая задается как свойство материала для решения задачи с образцами с отверстиями.

Вид образцов представлен на рис. 3.1. Геометрические размеры образцов эквивалентны размерам образцов для экспериментальных испытаний. Для сплошного образца можно заметить, что брусок разделен на три части. Это связано с тем, что средняя часть образца является рабочей областью, где реализованы однородные деформации и составляет 50 мм, что соответствует размерам экстензометра. Верхняя и нижняя часть бруска рассчитывалась исходя из общей длины образцы с вычетом длины рабочей области.



а) Сплошной образец

б) Образец с отверстием

Рис. 3.1. Геометрия брусьев двух типов. А) закрепление; Б) растяжение

Для расчета поставленной задачи необходимо задать граничные условия. Одна из концевых сторон бруска закреплялась и задавалось условие не перемещения относительно всех осей. Противоположная сторона растягивалась с возрастающей силой. В качестве примера представлено задание силы для материала Lexan 500 (рис. 3.2), где на верхнюю часть действует сила, а нижняя часть закреплена.

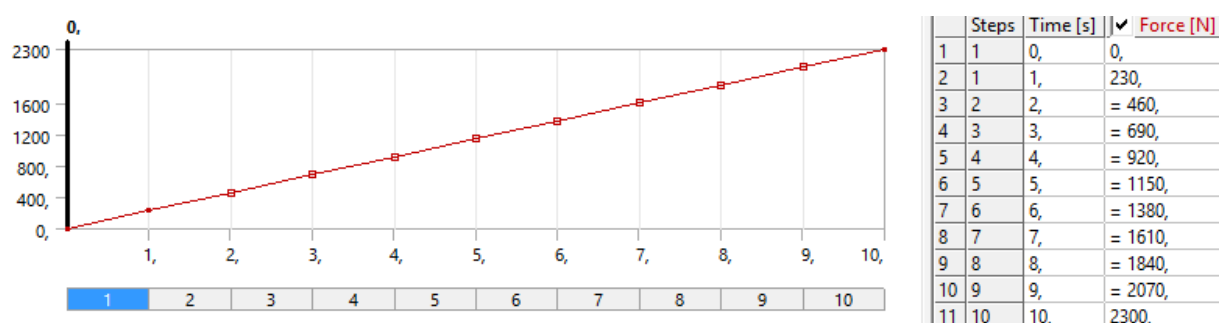


Рис. 3.2. Задание растягивающей силы

3.3 Особенности решения задач механики сплошных сред с использованием нелинейных свойств материалов.

Поведение материала подчиняется весьма сложным закономерностям. Для получения хорошего соответствия между расчетными результатами и фактическим откликом материала используется широкий набор приближений.

Наиболее простой моделью для описания упругой и пластической областей является билинейная модель.

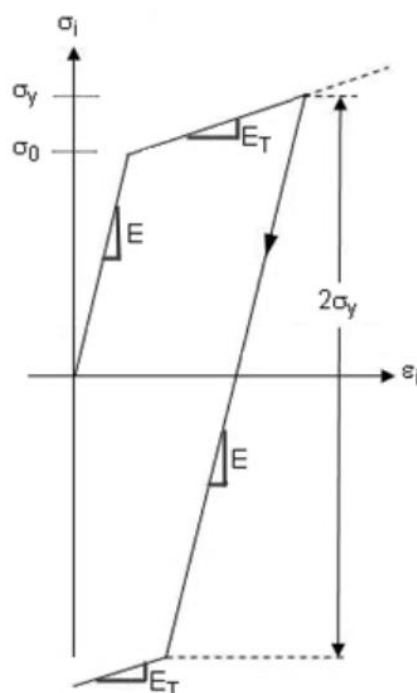


Рис. 3.3. Билинейная модель материала.

Как можно понять из названия, данная модель состоит из двух линейных участков. Начальный участок кривой соответствует области упругости, её наклон определяется модулем Юнга E . Этот участок продолжается до точки перегиба σ_0 , которая в ANSYS называется пределом текучести (*initial yield stress*), а в реальности совмещает в себе: предел упругости, и предел пропорциональности (который иногда называют пределом текучести для остаточной деформации). Второй линейный участок имеет наклон, определяемый модулем упругости E_T , задаваемым пользователем. При этом

наклон второго участка должен быть больше нуля, но меньше наклона первого участка.

Очевидно, что такое приближение для описания поведения материала является достаточно грубым, тем не менее в большинстве справочных ресурсов отсутствуют данные о форме диаграммы напряжение-деформация, но присутствуют величины модуля упругости и пределов пропорциональности, текучести и прочности и т.д. В этом случае использование билинейного приближения является оптимальным выбором.

Мультилинейная модель, в отличие от билинейной задаётся набором точек, по которым строится кусочно-линейная аппроксимация диаграммы напряжение-деформация в области пластических деформаций. Таким образом зона линейной и нелинейной упругости задается отдельно. При этом первая точка $(\varepsilon_1, \sigma_1)$ должна соответствовать σ_0 – пределу пропорциональности (текучести для остаточной деформации в терминах ANSYS). Деформация ε_1 должна быть задана равной нулю, а соответствующее ей напряжение σ_1 максимальной величине упругих напряжений. Таким образом, кривая описывает только пластическую область диаграммы.

Начальный участок модели, до предела пропорциональности считается линейным и задаётся при помощи модуля Юнга E . Нужно обратить внимание, что ε_1 , σ_1 на диаграмме деформирования должны соответствовать модулю Юнга (т. е. наклону графика), заданному для упругого участка.

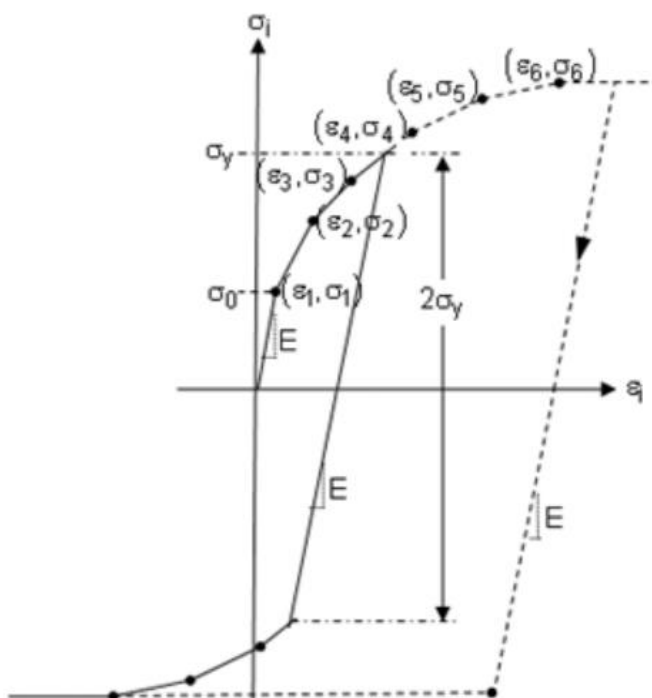


Рис. 3.4. Мультилинейная модель материала.

Связано это с тем, что при расчетах ANSYS, равно как и многие другие известные пакеты конечноэлементного моделирования, разделяет упругие (*elastic*) и неупругие (*plastic*) деформации.

В случае наличия справочных данных о диаграмме напряжение-деформация или экспериментальных данных испытаний материала выбор этой модели будет оптимальным.

Кроме вышеописанных моделей, существуют так же две модели: *Power Law* и *Voce Law*, предлагающие экспоненциальную аппроксимацию нелинейного участка диаграммы напряжение-деформация.

3.3.1 Задание свойств материала в ANSYS

Свойства полимеров важны для проектирования пластиковых деталей и прогнозирования их рабочих характеристик под напряжением, особенно при использовании в конструкционных применениях.

Для получения значений точек кривой, задаваемой в ANSYS, необходимо из значений деформации, полученных в эксперименте вычесть

значения упругой деформации, которая рассчитывается по модулю Юнга. В качестве первой точки $(\varepsilon_1, \sigma_1)$ кривой берётся последнее значение σ при котором упругие деформации и данные, полученные с экстензометра совпадают. При этом ε_1 полагают равным 0. Полученная таким образом первая точка и будет соответствовать σ_0 – пределу пропорциональности (текучести для остаточной деформации) рис. 3.5.

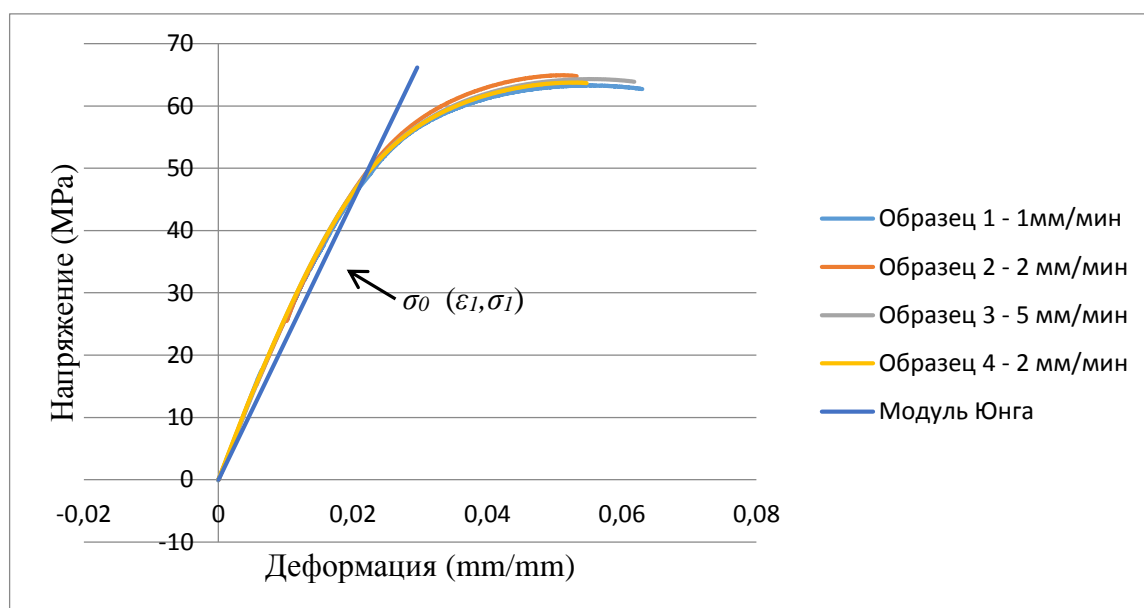


Рис. 3.5. Начальный участок диаграммы напряжение-деформация для Lexan 940A

Как уже было указано выше, модель материала, полученная из экспериментальных данных должна содержать значение модуля Юнга и задаваемую по точкам кривую упрочнения, содержащую только пластические деформации.

На Рис. 3.6 представлено окно Engineering Data в Workbench с созданным материалом на основе экспериментальных данных для Lexan 940A.

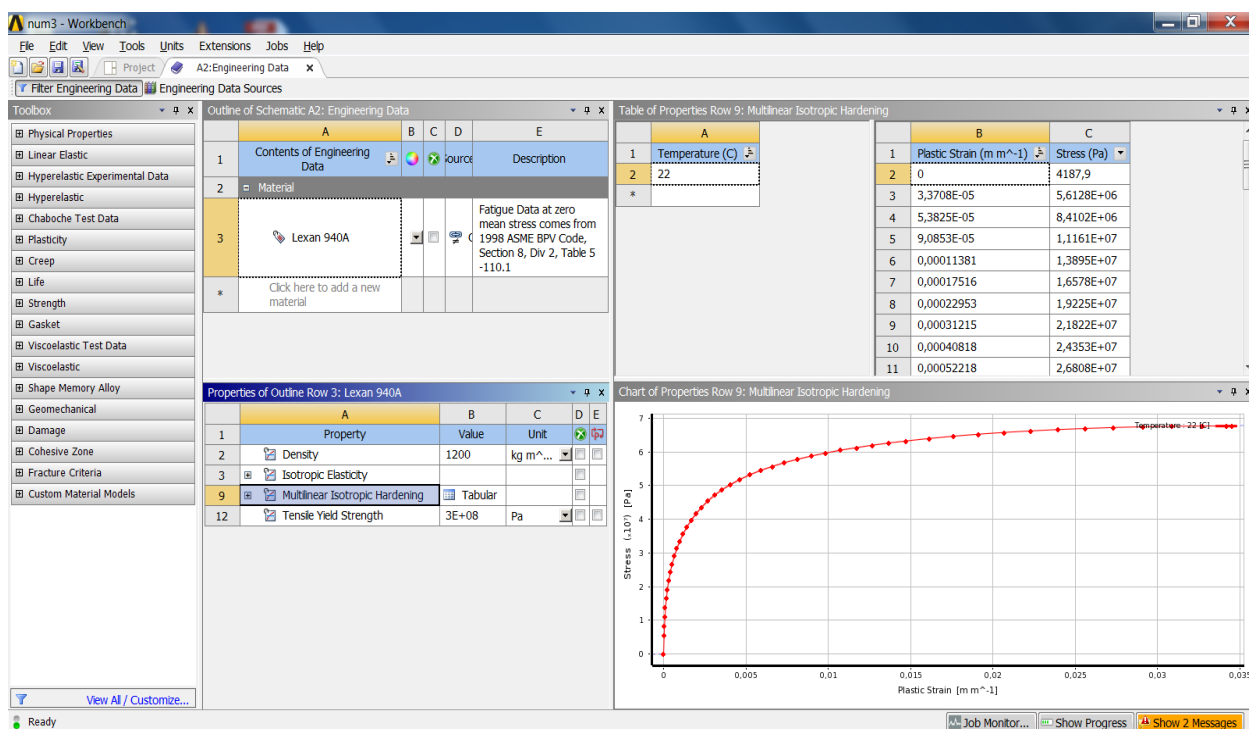


Рис. 3.6. Окно свойств Engineering Data.

Полученные на основе экспериментальных данных модели материалов в дальнейшем были использованы для верификационных расчетов.

3.4 Результаты моделирования.

3.4.1 Результаты моделирования образцов из поликарбонатов. Сопоставление результатов эксперимента с моделированием.

Для образцов из поликарбонатов Lexan 940A и Lexan 3412R были посчитаны задачи со сплошной геометрией образцов и с отверстиями различных диаметров. Контурные графики эквивалентного растягивающего напряжения представлены на рис. 3.7 и являются идентичными для всех видов поликарбонатов, изменяются лишь величины.

Полученные экспериментальные данные позволили создать модель материала в ANSYS Workbench, содержащую реальную кривую напряжение-деформация. При этом данная модель описывает только восходящий участок кривой. Описывать процессы разупрочнения и текучести в рамках одной стандартной модели ANSYS не позволяет.

После создания материалов и моделей в ANSYS были проведены расчеты для сплошной модели, и моделей с круглыми отверстиями.

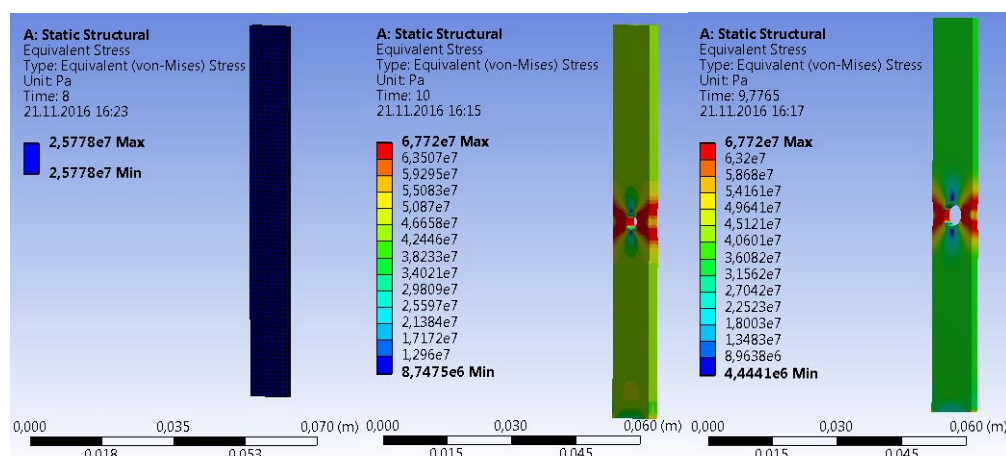


Рис. 3.7. Расчетные модели.

Главной особенностью данной работы является то, что представленные результаты получены путем совместного использования экспериментального исследования и компьютерного моделирования. Следует обратить внимание на то, что методика численного моделирования не является обособленной от эксперимента, а наоборот, предполагает наличие некоторых экспериментальных исследований для получения кривой напряжение-деформация.

Численный расчет в ANSYS в ходе решения позволил определить удлинение образца, которое было переведено в деформацию для получения зависимости напряжение-деформация.

В результате проведённых расчётов были получены графики перемещения в зависимости от приложенного усилия для сплошного образца и образцов с отверстиями, которые представлены ниже:

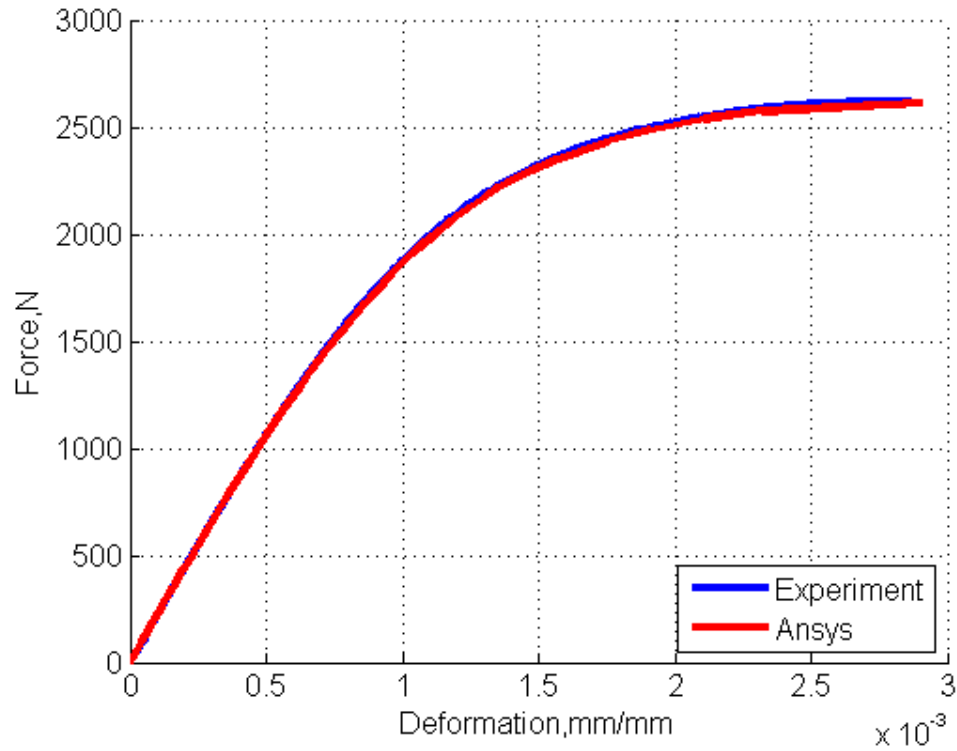


Рис. 3.8. Lexan 940A. Результаты моделирования и эксперимента для сплошного образца.

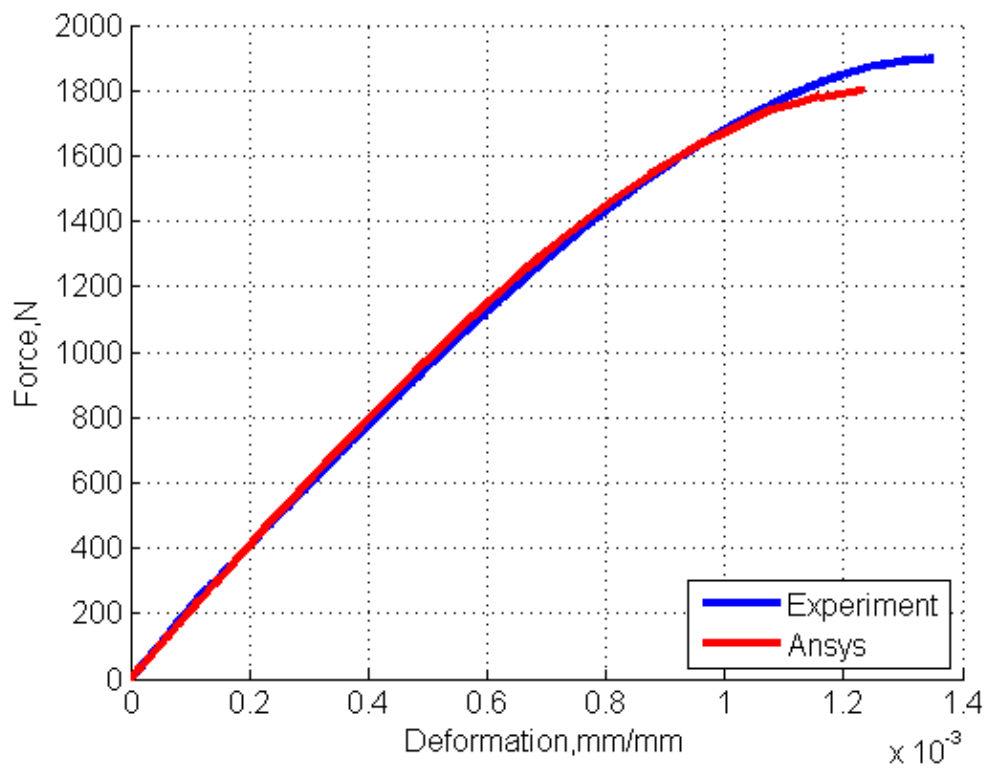


Рис. 3.9. Lexan 940A. Результаты моделирования и эксперимента для образца с отверстием 3,15 мм.

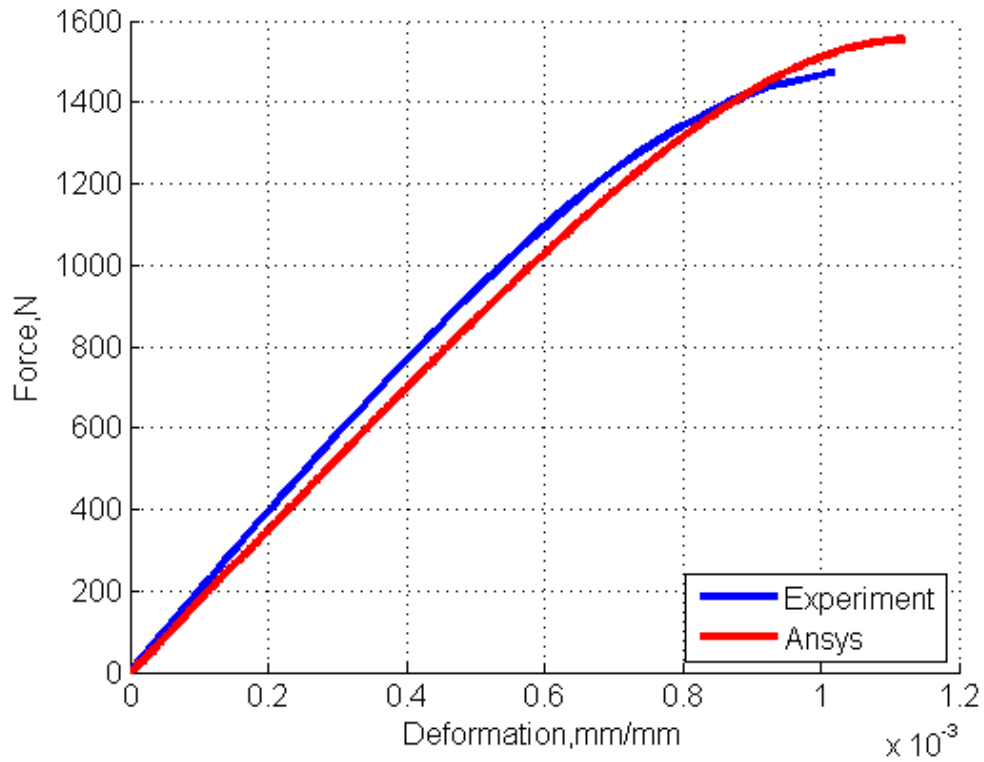


Рис. 3.10. Lexan 940A. Результаты моделирования и эксперимента для образца с отверстием 4,6 мм.

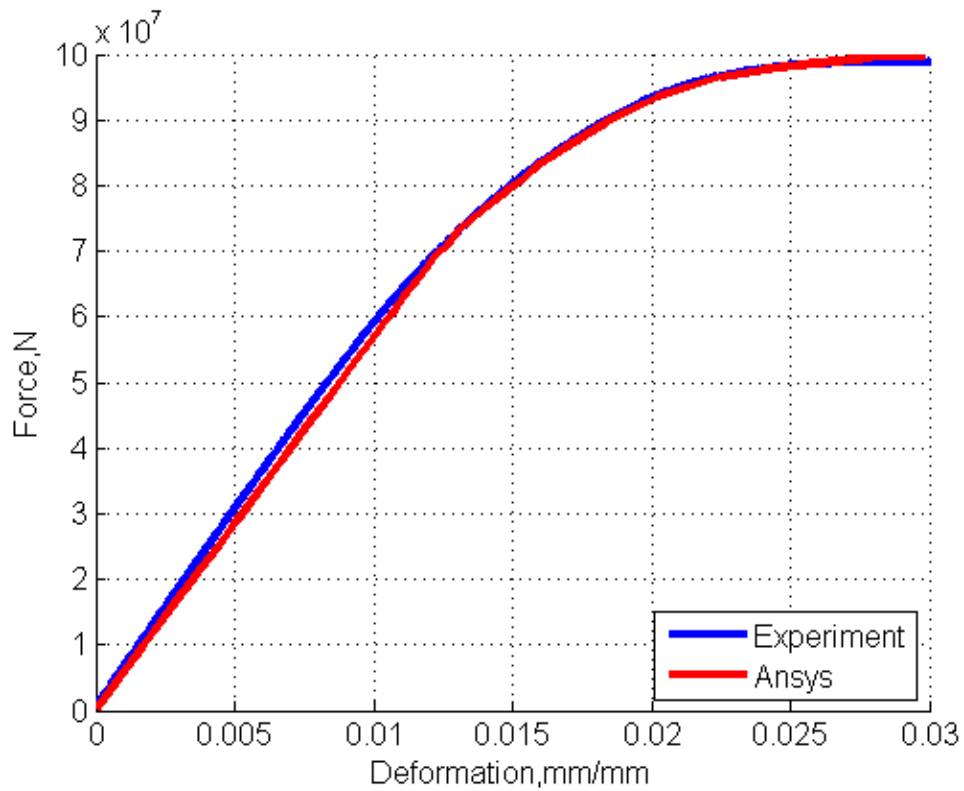


Рис. 3.11. Lexan 3412R. Результаты моделирования и эксперимента для сплошного образца.

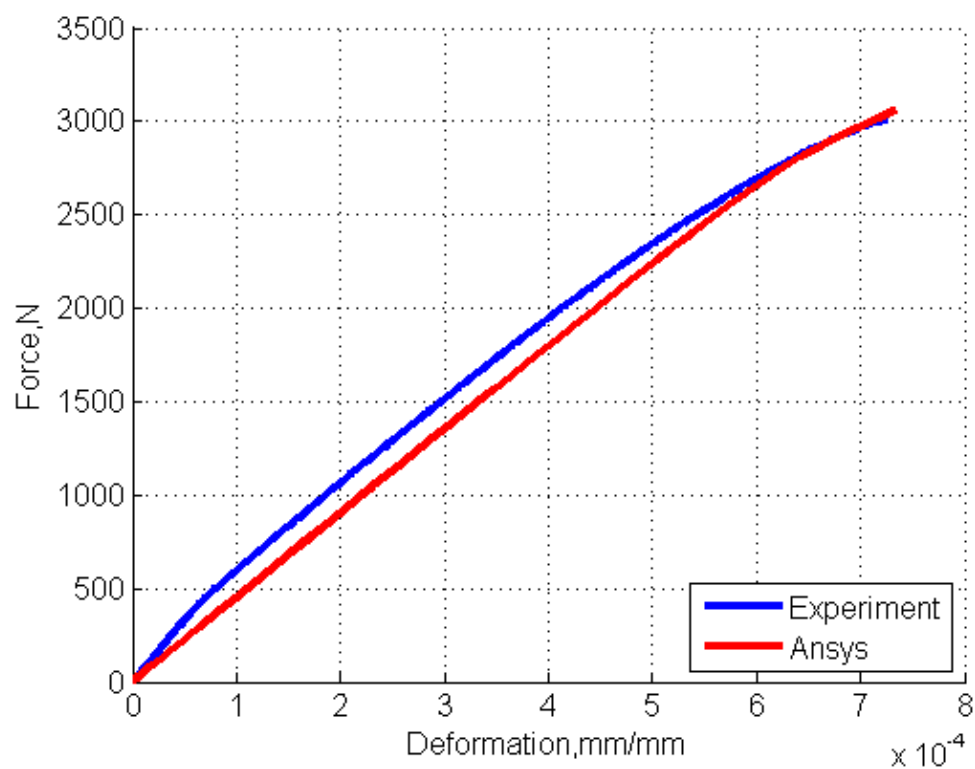


Рис. 3.12. Lexan 3412R. Результаты моделирования и эксперимента для образца с отверстием 2 мм.

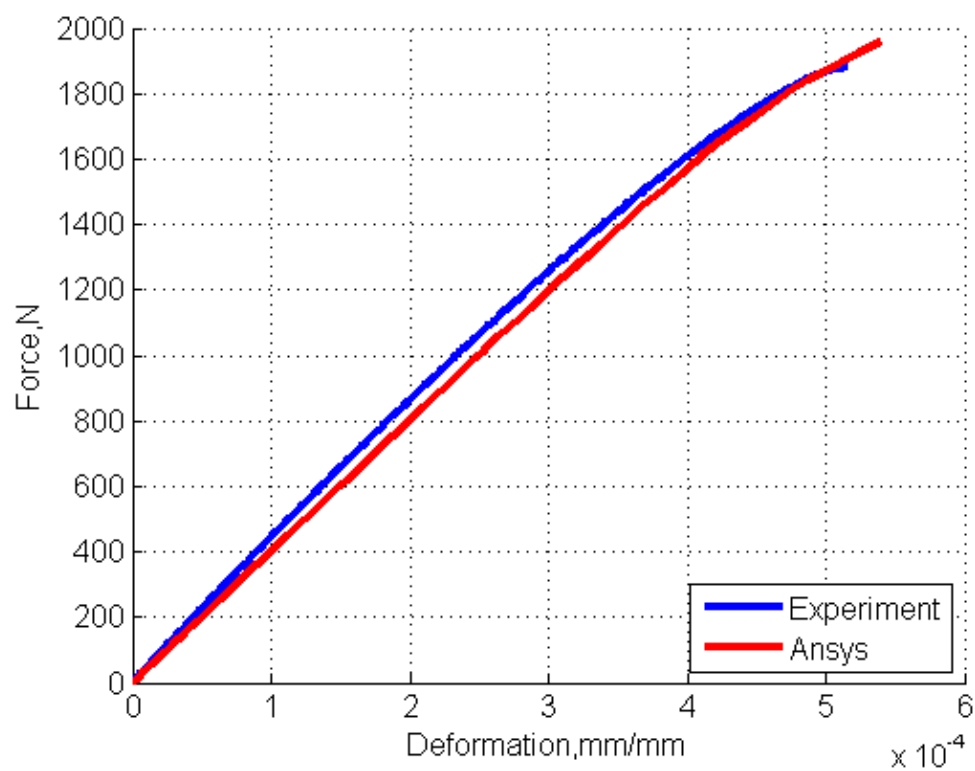


Рис. 3.13. Lexan 3412R. Результаты моделирования и эксперимента для образца с отверстием 5 мм.

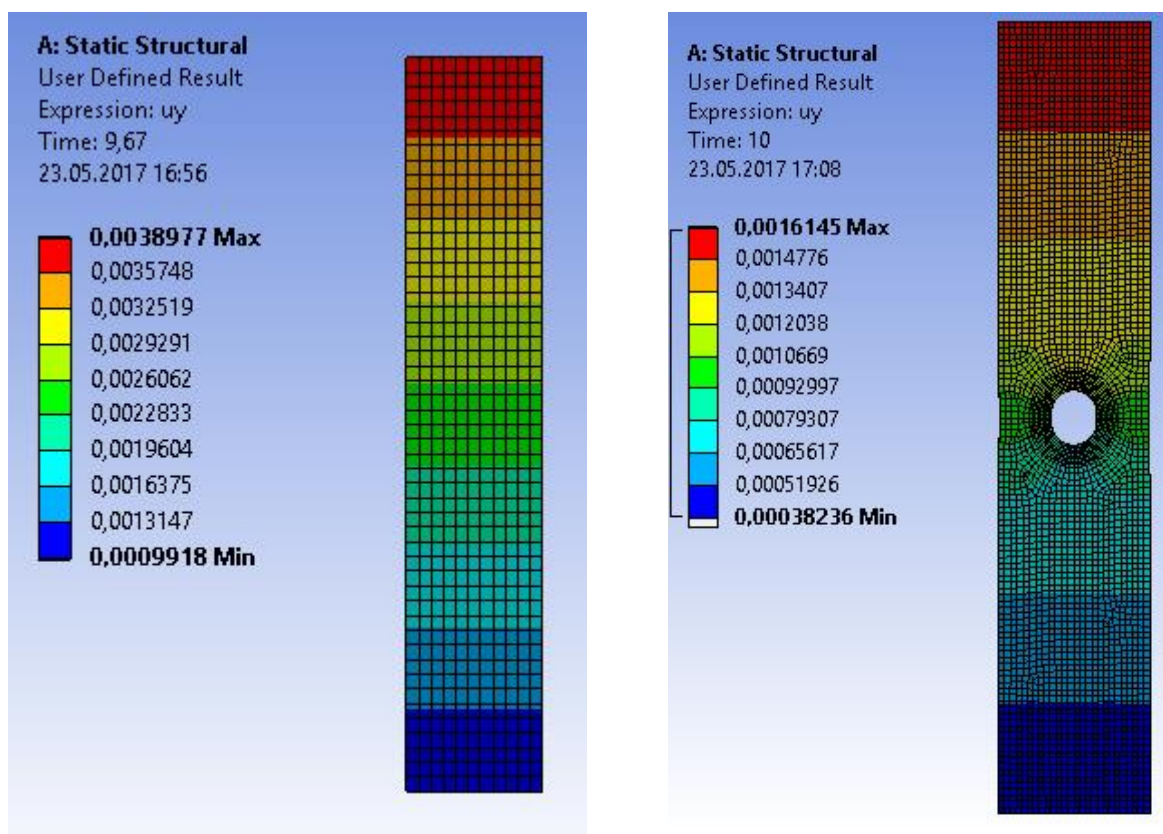


Рис. 3.14. Одноосное растяжение для сплошного образца и область концентрации напряжения для образца с отверстием.

Можно заметить, что как для сплошной модели с сугубо одноосными напряжениями, так и для моделей с различными отверстиями где явно выражены области концентрации напряжений результаты моделирования хорошо совпадают с экспериментальными данными. Во всех случаях разница между экспериментом и расчетом не превосходит 7-10%, что сопоставимо с разбросом экспериментальных данных по различным образцам. Таким образом можно сделать вывод о возможности применения данных испытаний образцов для инженерных расчётов.

Как показал недавний опыт тестового доступа к базе *Total Materia*, даже в крупных коммерческих источниках не всегда можно найти свойства материалов в виде кривых напряжение-деформация. Особенно это характерно для материалов, произведённых в России и странах СНГ. Производители так же не всегда предоставляют подобные сведения, ограничиваясь такими параметрами как модуль Юнга, предел текучести, предел прочности,

остаточное удлинение при разрыве и т.д. На основе таких данных можно построить только билинейную модель материала.

Для примера, в большинстве открытых источников производителей (*General Electric Company* и *Saudi Basic Industries Corporation*) для поликарбоната Lexan 940A указаны: модуль упругости ~ 2240 МПа, предел текучести при растяжении 62 МПа, при соответствующем растяжении 7%. Предел упругости у обоих производителей не указывается (надо заметить, что в документации *SABIC* есть упоминание о пределе упругости, возможно он доступен в закрытой части). Представив эти данные на графике видно, что не зная предел упругости материала, построение даже билинейной модели материала не представляется возможным. Предположим, что нам известен предел упругости (либо мы можем его оценить), и нанесём его на график (Рис. 3.15). В результате появляется возможность определить наклон второго участка и построить билинейную модель материала для Lexan 940A.

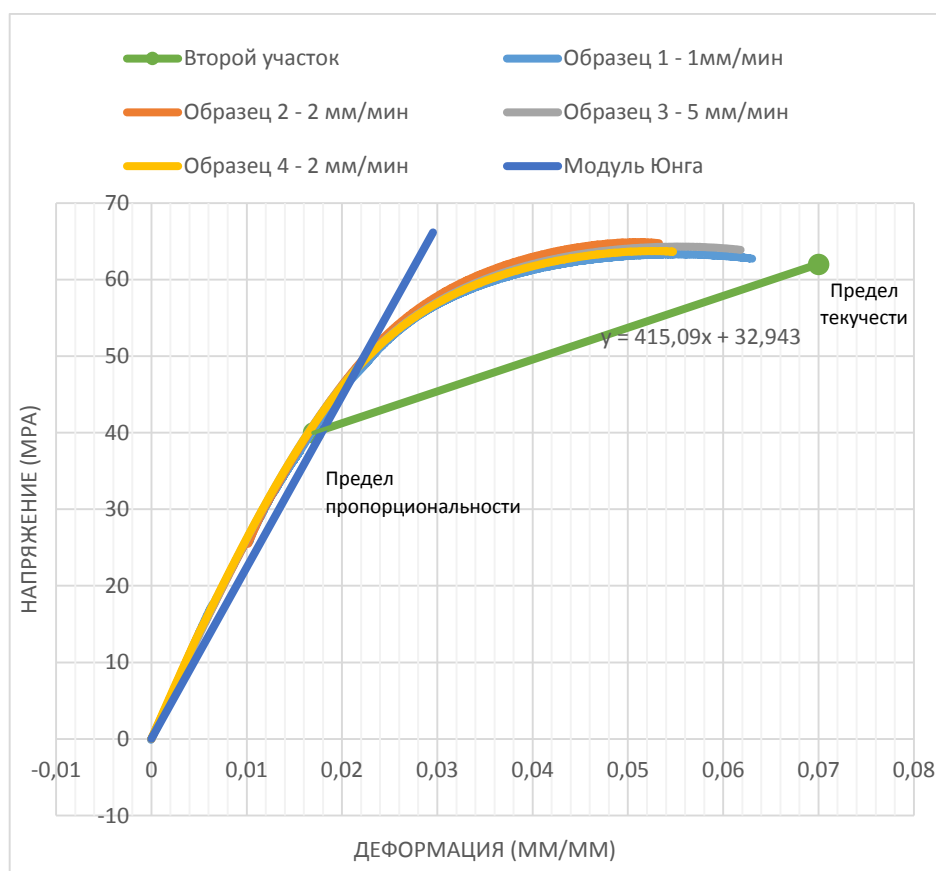


Рис. 3.15. Создание билинейной модели для Lexan 940A на основе данных производителей.

Ниже приведены результаты расчётов с использованием билинейной модели в сравнении с экспериментальными данными и результатами расчёта с использованием мультилинейной модели для образца с отверстием 3,15 мм.

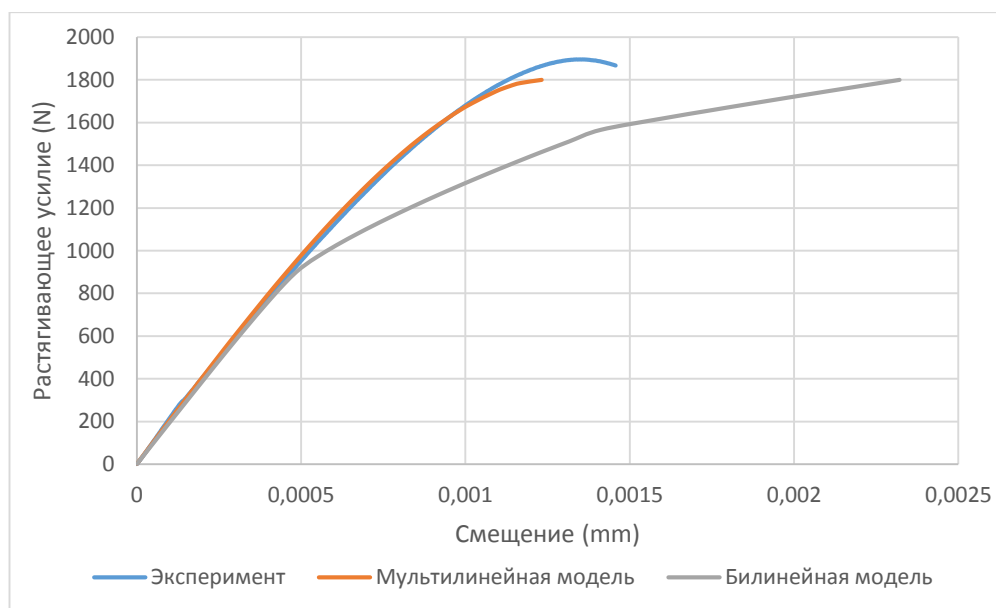


Рис. 3.16. Сравнение мультилинейной и билинейной моделей.

Можно сделать вывод, что построение и использование билинейной модели пригодно только для очень грубых оценок прочности и не может быть использовано для описания поведения конструкции на всём протяжении упругой области.

Ниже на рис. 3.17 приведены результаты моделирования сплошного образца для двух вышеперечисленных вариантов задания модели материала в сравнении с экспериментом для материала Lexan 500R.

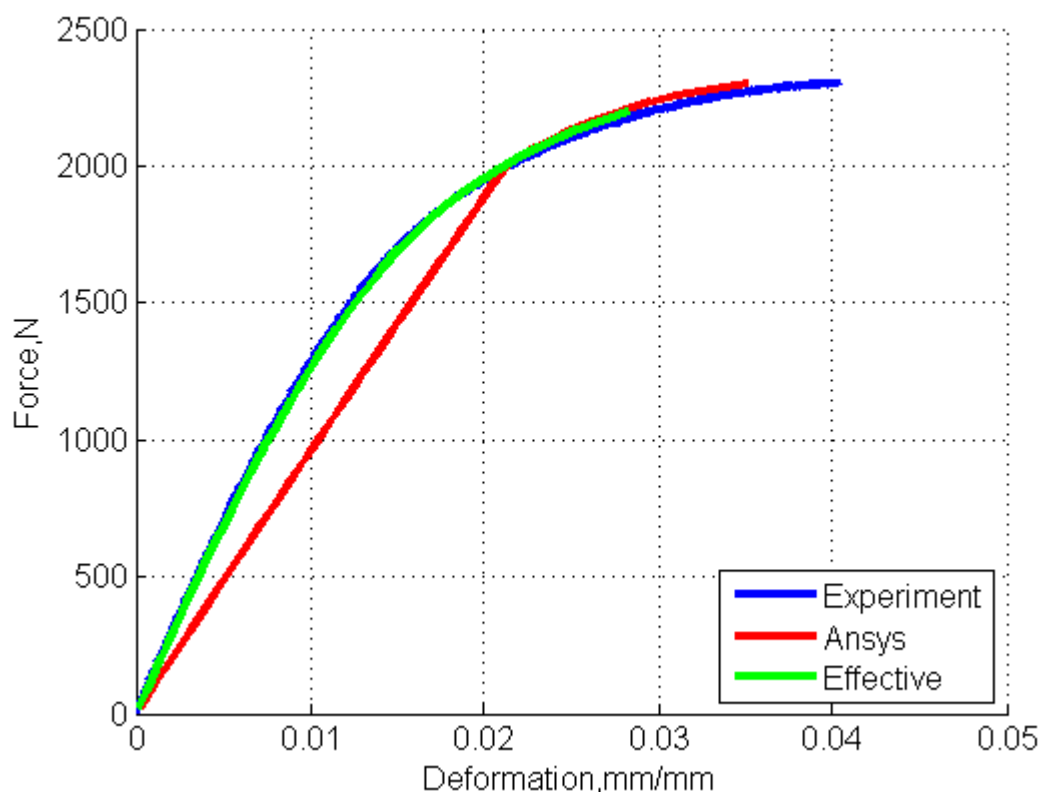


Рис. 3.17. Lexan 500R. Результаты моделирования и эксперимента для сплошного образца.

Можно заметить, что более точное совпадение с экспериментальными данными дает второй метод, использовавший эффективный модуль Юнга, который был выбран в 10 раз больше настоящего.

3.4.2 Результаты моделирования образцов из полиамидов. Сопоставление результатов эксперимента с моделированием.

Численные расчеты для каждого из видов полиамида были проведены согласно с расчетной методикой упругопластического деформирования с помощью конечно элементного пакета ANSYS.

Использовались два вышеописанных метода, а именно решались задачи с помощью секущего модуля и завышенного модуля Юнга. Результаты сравнения экспериментальной кривой для сплошных образцов и моделирования представлены ниже. Данная методика была использована как для сухих, так и для влажных образцов.

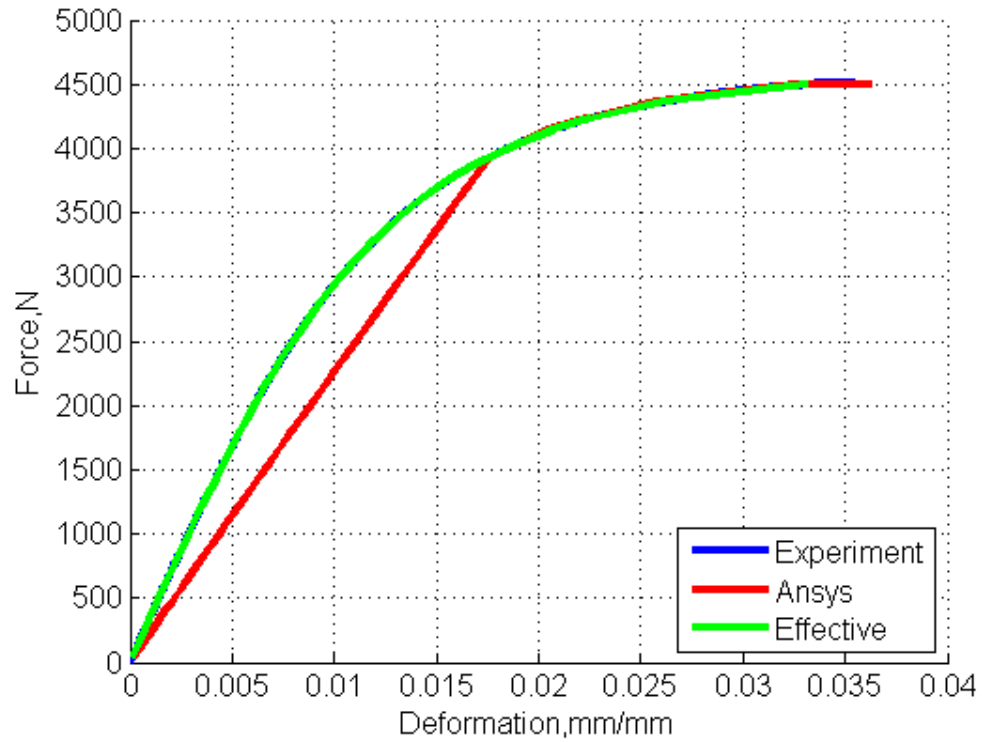


Рис. 3.18. Aramid PASV30. Результаты моделирования и эксперимента для сухого образца.

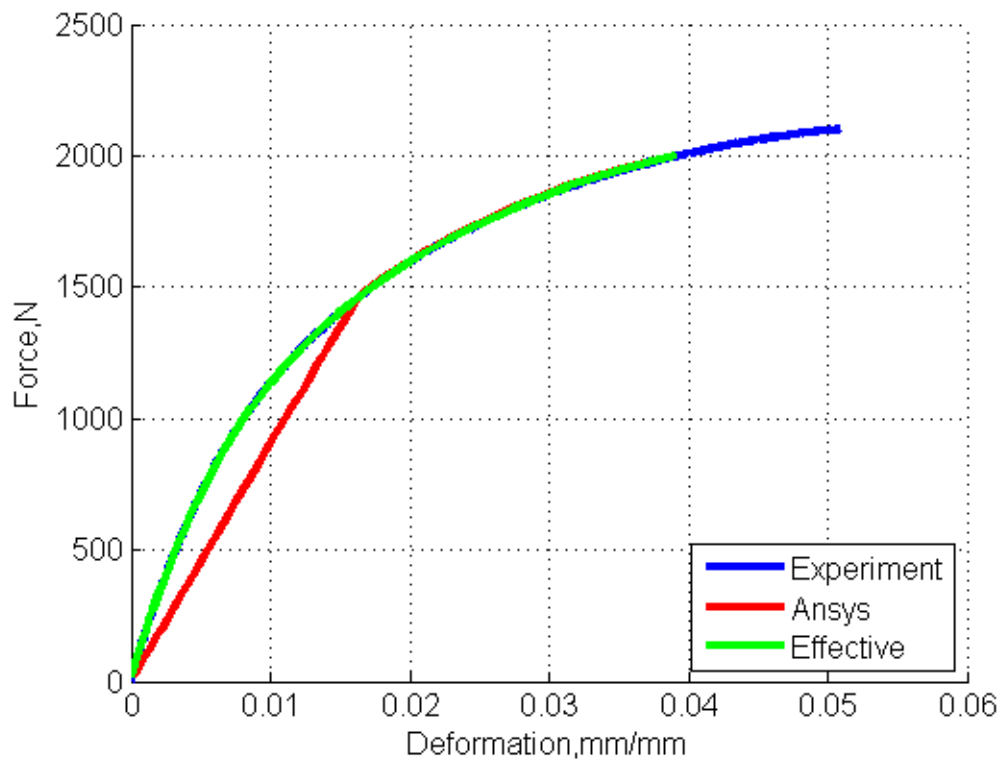


Рис. 3.19. Aramid PASV30. Результаты моделирования и эксперимента для влажного образца.

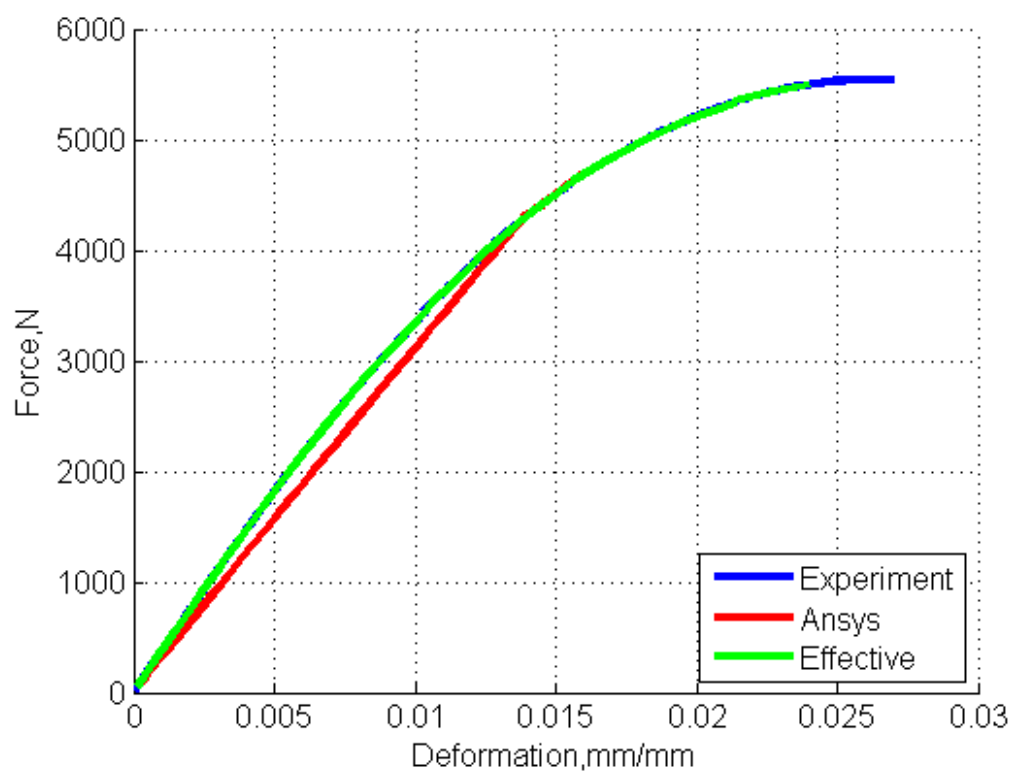


Рис. 3.20. Tehnamid_PA66. Результаты моделирования и эксперимента для сухого образца.

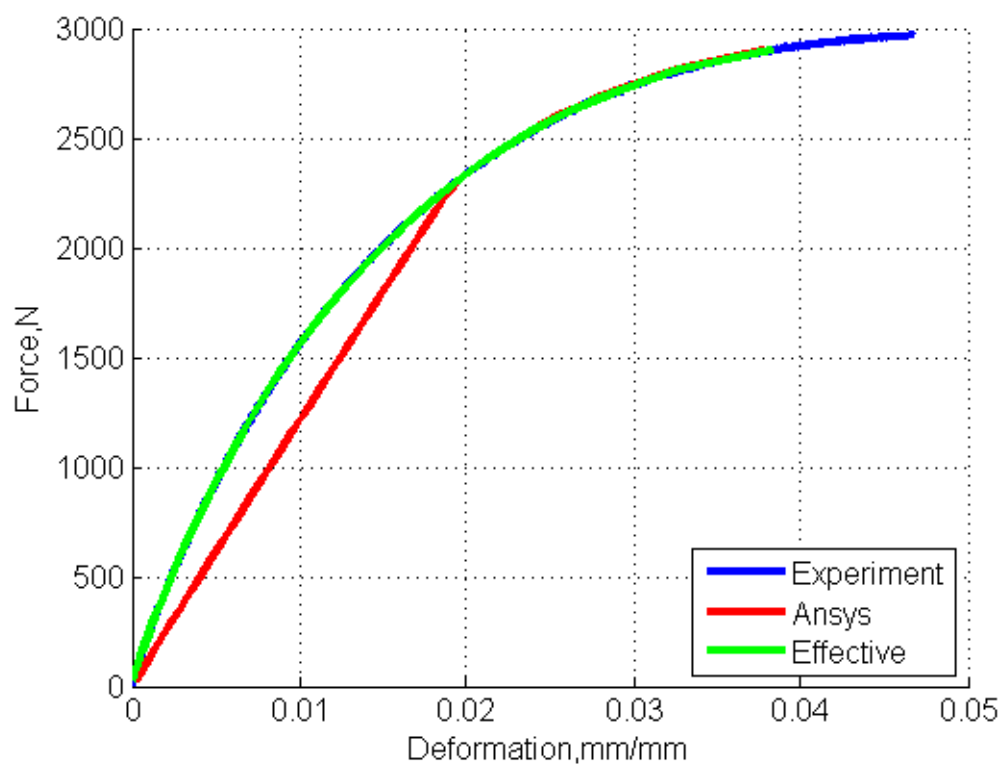


Рис. 3.21. Tehnamid_PA66. Результаты моделирования и эксперимента для влажного образца.

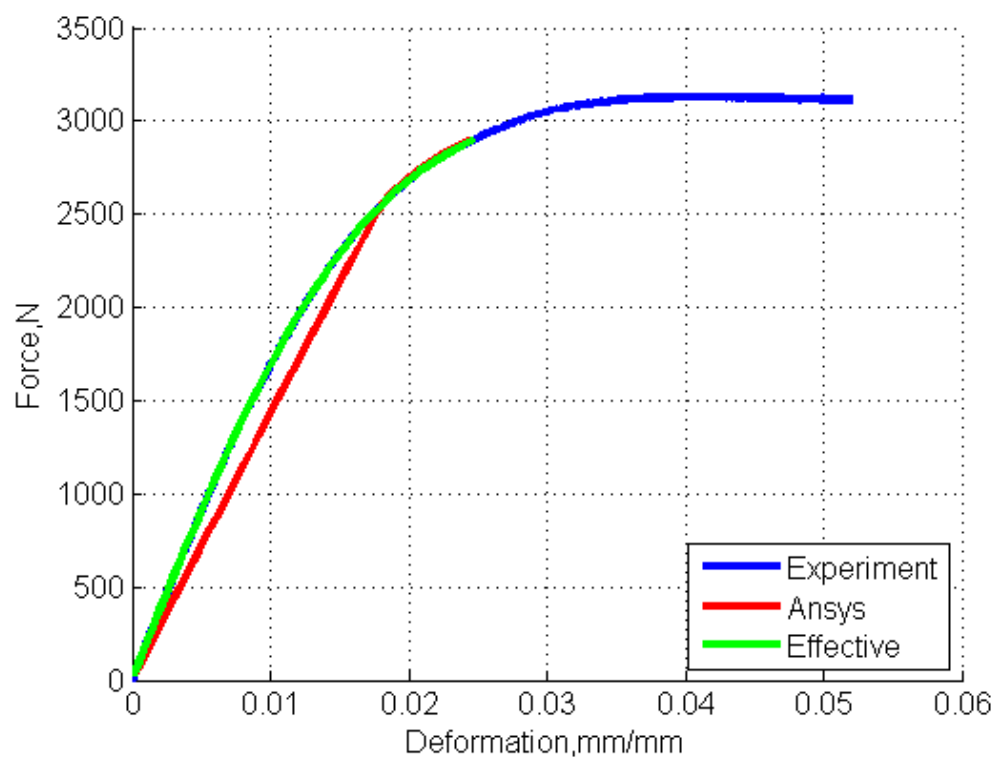


Рис. 3.22. BASF B3ZG3. Результаты моделирования и эксперимента для сухого образца.

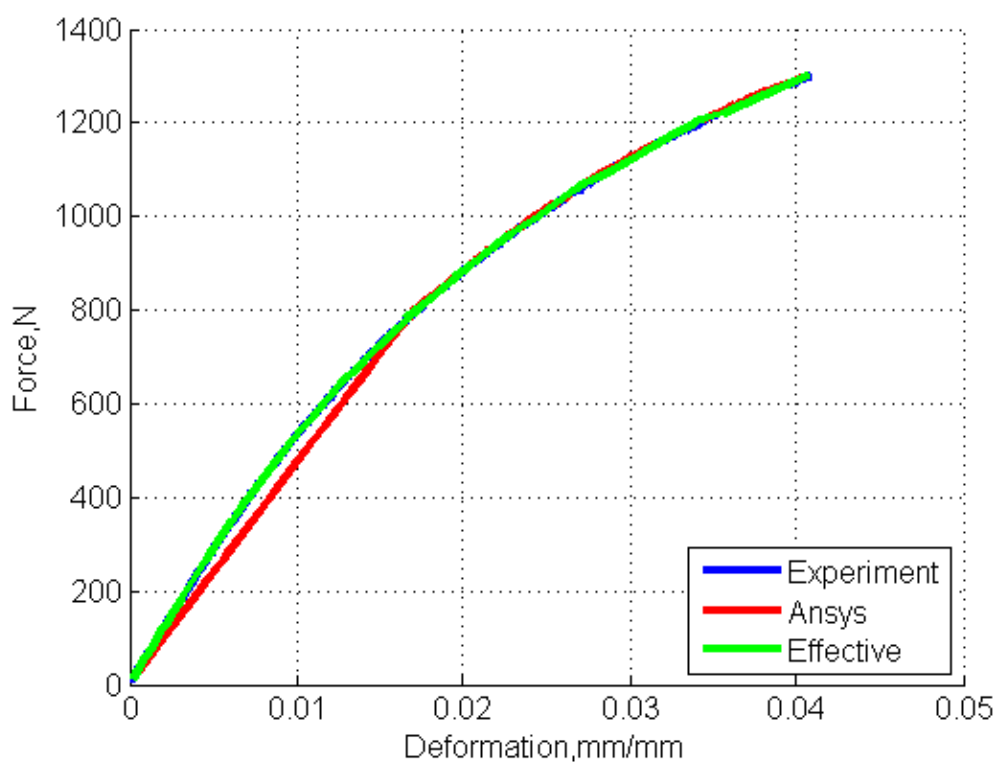


Рис. 3.23. BASF B3ZG3. Результаты моделирования и эксперимента для влажного образца.

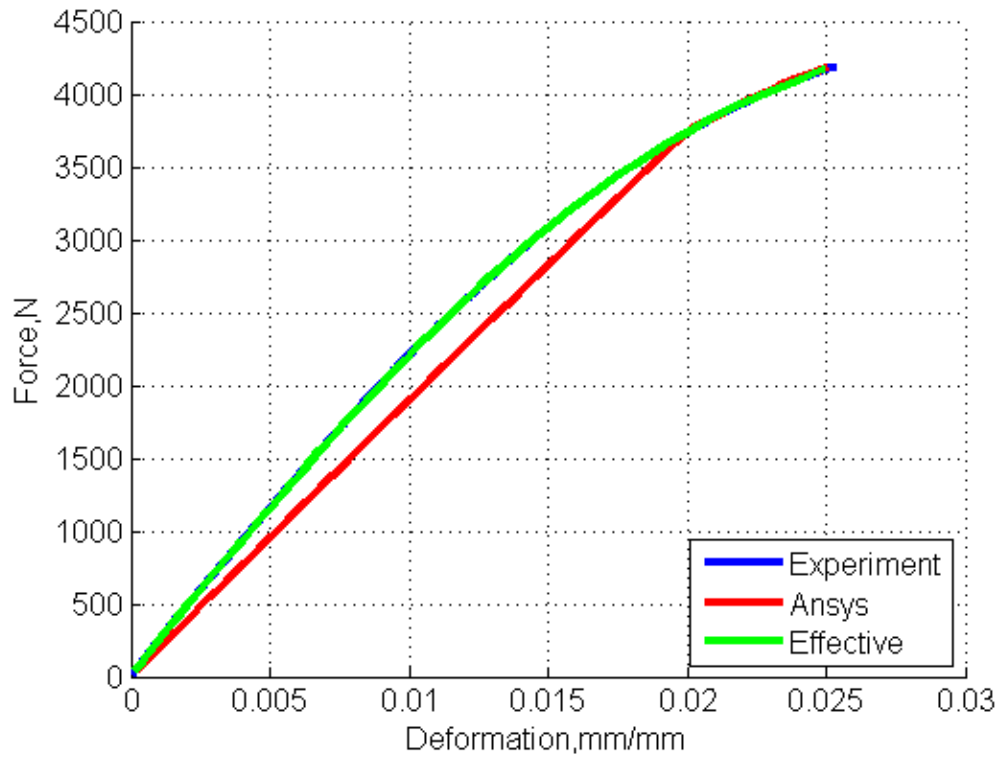


Рис. 3.24. Poliamid PA610 SV30. Результаты моделирования и эксперимента для сухого образца.

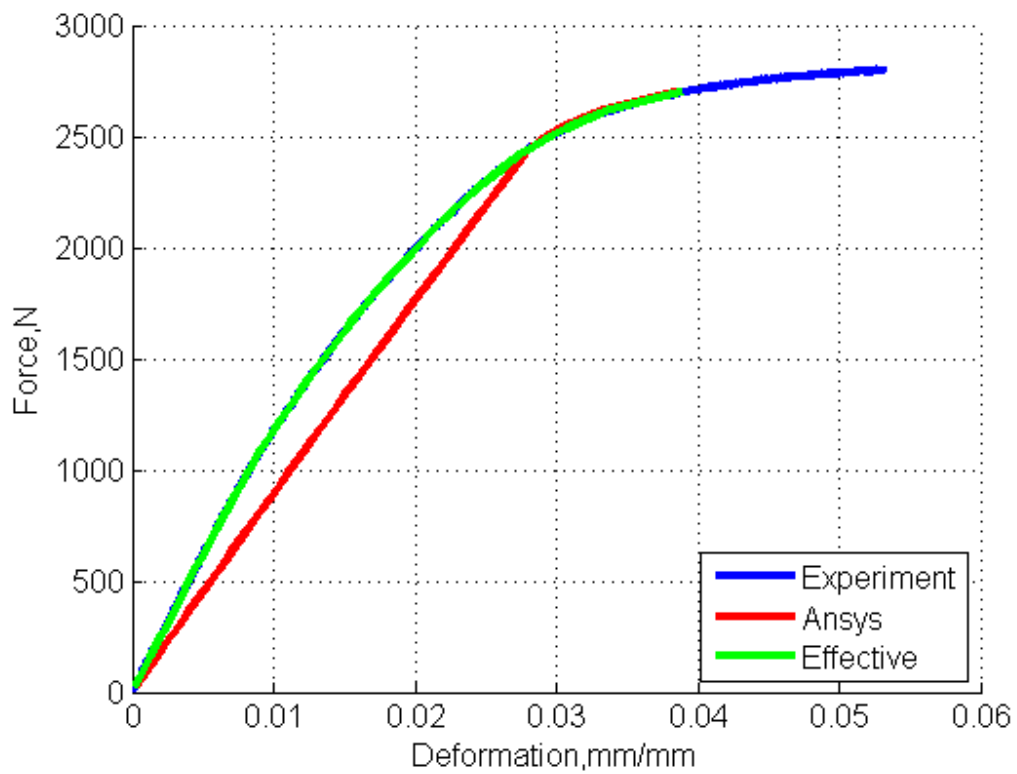


Рис. 3.25. Poliamid PA610 SV30. Результаты моделирования и эксперимента для влажного образца.

3.5 Выводы

1. Использование экспериментальных данных является лучшим способом для построения модели материала в ANSYS.

2. Для описания упругих деформаций возможно использовать методику секущего модуля. Тогда нелинейные упругие деформации будут отсутствовать, так как линейный участок задается прямой. В этом случае все упругие деформации будут описываться модулем Юнга. Также можно заметить несовпадение экспериментальной кривой и кривой, полученной в ходе моделирования. Преимущество данного метода заключается в том, что она позволяет получать информацию о деформациях при снятии нагрузки.

3. Для совпадения экспериментальной кривой напряжение-деформация и полученной в ходе моделирования необходимо использовать методику с искусственным модулем Юнга. При этом линейный участок сокращается в несколько раз и практически все деформации будут интерпретироваться как пластические. В таком случае нужно понимать, что адекватные результаты расчета будут получаться только при монотонно возрастающей нагрузке. Значение остаточных деформаций при снятии нагрузки будет рассчитываться неверно. Однако, полные деформации будут считать правильно.

Список литературы

1. Николаева Е.А. Основы механики разрушения. «Пермский государственный технический университет» 2008 – 114с
2. Теория термической обработки материалов. Учебник для вузов. 4 – е издание, перераб. и допол.: Новиков И. И.: Металлургия, 1986г. – 480с.
3. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006, - 328 с.
4. Кочетов В. Т., Кочетов М. В., Павленко А. Д. Сопротивление материалов: Учеб. пособие для вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. –СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 544 с.: ил.
5. Материаловедение: учебное пособие / И.М. Жарский [и др.]. – Минск: Высшая школа, 2015. – 557 с.: ил.
6. Сутягин В. М. Основные свойства полимеров: учебное пособие / В. М. Сутягин, О. С. Кукурина, В. Г. Бондалетов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 96 с.
7. И.И. Тугов, Г. И. Кострыкина Химия и физика полимеров.: Учебное пособие для вузов. — М.: Химия, 1989. — 432 с.
8. Производство изделий из полимерных материалов: Учеб. пособие/В.К. Крыжановский, М.Л. Кербер, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко. - СПб.: Профессия, 2004. – 464 с., ил.
9. Бобович Б.Б. Неметаллические конструкционные материалы.: учебное пособие. – М.: МГИУ, 2009, -384 с.
10. Экспериментальная механика: конспект лекций / В. Н. Сорокин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 116 с.
11. Кутрунова, З.С. Техническая механика. Методические указания к лабораторной работе «Испытание материалов. Растяжение стального образца с измерением упругих деформаций» для студентов направления 280700.62 «Строительство» всех форм обучения

/З.С.Кутрунова. - Тюмень: РИО ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ», 2014. – 19 с.

12. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытания на растяжение.
13. ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение.
14. A. Avanzini Mechanical Characterization and Modeling of Polymeric Materials for High-pressure Sealing Experimental Mechanics, 2005, Volume 45, Number 1, Page 53
15. Решение задач теории упругости с применением Mathcad14.0: учеб. пособие. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2010. 75 с.